

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

机械制造工艺学

刘传绍 苏建修 主 编

郑建新 赵 武 副主编

姬清华 宁李谱 连黎明 参 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍机械零件冷加工和装配工艺中的共性规律问题,内容包括机械加工工艺规程的制定、机床夹具设计、典型零件加工与加工方法、机械加工质量、机器的装配工艺、提高劳动生产率和技术经济分析、现代制造技术的发展与前沿等。

本书适合本科院校和高职高专院校机械类专业和近机械类专业用做教材或参考书,也可供从事机械制造的工程技术人员参考和培训使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造工艺学 / 刘传绍, 苏建修主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.9

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

ISBN 978-7-121-13596-5

I. ①机… II. ①刘… ②苏… III. ①机械制造工艺—高等学校—教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 091253 号

策划编辑: 李 洁

责任编辑: 刘 凡

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.75 字数: 531 千字

印 次: 2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

《机械制造工艺学》是机械类专业的主要专业课之一。本书是按照全国高校教育教学改革要求,遵循“重视基础、精简学时、拓宽口径”的改革思路,结合自身教学工作实践和高等学校近年来教学改革探索与实践经验成果编写而成的。本书可作为本科院校和高职高专院校机械类专业和近机械类专业的专业课教材。

为了有利于掌握本书的基本内容和教学重点,本书在内容安排和知识阐述方面,注重循序渐进,力求深广适度,坚持内容少而精。除第3章“典型零件加工与加工方法”和第8章“现代制造技术的发展与前沿”供各院校结合具体情况选择性教学外,主要内容包括工艺规程的制订、机床夹具设计、机械加工质量控制等,大体上适用于64学时左右的教学要求。

本书由河南理工大学刘传绍教授组织编写。编写大纲由刘传绍、苏建修、郑建新、赵武四位同志共同制订。编写人员及负责的编写工作如下:第1章和第4章由河南理工大学刘传绍和郑建新共同编写,第7章由河南科技学院苏建修编写,绪论和第5章由河南理工大学赵武编写,第2章由河南科技学院宁李谱编写,第3章由新乡学院姬清华编写,第6章和第8章由新乡学院廉黎明编写。全书由刘传绍和苏建修任主编,由郑建新负责统稿及初稿修订工作。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中不妥之处难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011年8月

目 录

绪论	(1)
0.1 机械制造工艺学的主要研究内容	(1)
0.1.1 制造业的地位和作用	(1)
0.1.2 制造技术的发展现状	(2)
0.1.3 制造自动化技术的发展趋势	(3)
0.1.4 现代制造技术的特点	(3)
0.1.5 制造工艺核心论	(4)
0.1.6 现代制造技术的发展方向	(6)
0.1.7 机械制造工艺的关键技术和新兴技术	(6)
0.2 内容和任务	(7)
0.3 学习方法	(7)
第1章 机械加工工艺规程的制定	(9)
1.1 机械加工工艺过程基本概念	(9)
1.1.1 生产过程与工艺过程	(9)
1.1.2 机械加工工艺过程的组成	(10)
1.1.3 生产类型及其工艺特点	(13)
1.2 机械加工工艺规程的制定	(15)
1.2.1 机械加工工艺规程的作用	(15)
1.2.2 制定工艺规程的原则、原始资料及步骤	(18)
1.3 制定机械加工工艺过程的主要问题	(21)
1.3.1 确定毛坯	(21)
1.3.2 定位基准选择	(24)
1.3.3 工艺路线的拟定	(29)
1.3.4 加工余量的确定	(34)
1.3.5 工序尺寸与公差确定	(38)
1.4 工艺尺寸链	(39)
1.4.1 尺寸链概念	(39)
1.4.2 尺寸链的分类	(40)
1.4.3 直线尺寸链的计算	(41)
习题1	(50)
第2章 机床夹具设计基础	(53)
2.1 概述	(53)
2.1.1 夹具的作用	(53)
2.1.2 夹具的分类	(54)
2.1.3 夹具的组成	(55)
2.2 定位原理及定位元件	(56)

2.2.1	定位原理	(56)
2.2.2	定位元件	(61)
2.3	定位误差分析	(68)
2.3.1	定位误差及产生的原因	(68)
2.3.2	定位误差分析计算	(70)
2.4	工件的夹紧及夹紧装置	(78)
2.4.1	夹紧装置的组成和基本要求	(79)
2.4.2	设计夹紧装置的基本准则	(79)
2.4.3	常见的夹紧装置	(82)
2.5	机床夹具设计	(88)
2.5.1	机床夹具设计的基本要求	(88)
2.5.2	夹具设计的基本步骤	(89)
2.6	典型夹具应用实例分析	(91)
2.6.1	车床夹具	(91)
2.6.2	钻床夹具	(92)
2.6.3	铣床夹具	(97)
2.6.4	镗床夹具	(99)
	习题 2	(100)
第 3 章	典型零件加工与加工方法	(102)
3.1	轴类零件加工	(102)
3.1.1	概述	(102)
3.1.2	CA6140 车床主轴的加工工艺	(105)
3.1.3	丝杠加工工艺	(111)
3.1.4	主轴的检验	(116)
3.2	圆柱齿轮加工	(117)
3.2.1	概述	(117)
3.2.2	圆柱齿轮的机械加工工艺过程及工艺分析	(119)
3.3	箱体加工	(124)
3.3.1	概述	(124)
3.3.2	箱体零件的结构工艺性	(126)
3.3.3	箱体零件机械加工工艺过程分析	(128)
3.3.4	箱体的平面加工	(132)
3.3.5	箱体零件的孔系加工	(133)
	习题 3	(138)
第 4 章	机械加工精度	(140)
4.1	概述	(140)
4.1.1	机械加工精度的概念	(140)
4.1.2	加工精度的获得方法	(141)
4.2	机械加工精度的影响因素及控制	(142)
4.2.1	工艺系统几何误差对加工精度的影响	(144)

4.2.2	工艺系统受力变形对加工精度的影响	(154)
4.2.3	工艺系统受热变形对加工精度的影响	(162)
4.2.4	工件残余应力引起的加工误差	(166)
4.3	保证和提高加工精度的途径	(168)
4.3.1	直接减小误差法	(168)
4.3.2	误差补偿法	(170)
4.3.3	误差分组法	(171)
4.3.4	误差转移法	(171)
4.3.5	“就地加工”达到最终精度	(172)
4.3.6	主动测量与闭环控制	(172)
4.4	加工误差的综合分析	(173)
4.4.1	加工误差的性质	(173)
4.4.2	加工误差的统计分析	(174)
	习题 4	(183)
第 5 章	机械加工表面质量	(185)
5.1	概述	(185)
5.1.1	机械加工表面质量含义	(185)
5.1.2	机械加工表面质量对机器产品使用性能和使用寿命的影响	(186)
5.1.3	机械加工表面质量的研究内容	(188)
5.2	表面粗糙度影响的工艺因素及其改善的工艺措施	(188)
5.2.1	切削加工表面粗糙度	(188)
5.2.2	磨削加工表面粗糙度	(191)
5.2.3	超精研、研磨、珩磨和抛光加工的表面粗糙度	(194)
5.3	影响表层力学物理性能的工艺因素及其改进的工艺措施	(197)
5.3.1	加工表面层的冷作硬化	(197)
5.3.2	表面层金属的金相组织变化	(201)
5.3.3	表面层金属的残余应力	(205)
5.3.4	表面层强化工艺	(207)
5.3.5	减小残余拉应力、防止表面烧伤和裂纹的工艺措施	(209)
5.4	控制加工表面质量的途径	(211)
5.4.1	控制加工工艺参数	(211)
5.4.2	采用适当的精加工与光整加工方法作为终加工工序	(212)
5.4.3	采用表面强化工艺	(214)
5.4.4	表面质量的检查	(215)
5.5	机械加工中的振动及其控制措施	(216)
5.5.1	机械加工中的振动及其分类	(216)
5.5.2	机械加工中的强迫振动及其控制措施	(217)
5.5.3	机械加工中的自激振动及其控制措施	(224)
5.5.4	机械加工中振动的诊断技术	(228)
5.5.5	机械加工振动的防治	(230)

习题 5	(232)
第 6 章 提高劳动生产率和技术经济性分析	(234)
6.1 提高劳动生产率的工艺措施	(234)
6.1.1 劳动生产率的基本含义	(234)
6.1.2 缩短基本时间	(235)
6.1.3 缩短辅助时间	(236)
6.1.4 同时缩短基本时间和辅助时间	(236)
6.1.5 缩短准备终结时间	(237)
6.2 提高劳动生产率的综合性措施	(238)
6.2.1 改进产品结构设计	(238)
6.2.2 改进产品加工工艺	(238)
6.2.3 改善产品生产组织和管理方式	(238)
6.2.4 采用计算机技术	(238)
6.3 工艺方案的技术经济性分析	(239)
6.3.1 工艺成本的组成	(239)
6.3.2 工艺成本的计算	(239)
6.3.3 工艺方案比较及经济性分析	(240)
6.4 高效及自动化加工	(241)
6.4.1 大批大量生产常用的加工方法	(241)
6.4.2 中小批生产常用的加工方法	(241)
6.4.3 各种自动化系统的经济性比较分析	(242)
6.5 机械加工的优化	(243)
6.5.1 概述	(243)
6.5.2 单工序切削用量的优化	(244)
6.5.3 多工序切削用量的优化	(248)
习题 6	(249)
第 7 章 机器的装配工艺	(250)
7.1 概述	(250)
7.1.1 机器装配的基本概念	(250)
7.1.2 装配系统图	(252)
7.1.3 装配精度与零件精度	(253)
7.2 装配尺寸链	(255)
7.2.1 装配尺寸链的建立	(255)
7.2.2 装配尺寸链的查找	(257)
7.2.3 装配尺寸链的计算方法	(259)
7.3 保证装配精度的方法	(259)
7.3.1 互换装配法	(260)
7.3.2 分组装配法	(267)
7.3.3 修配装配法	(269)
7.3.4 调整装配法	(274)

7.4	装配工艺规程的制定	(277)
7.4.1	准备原始资料	(277)
7.4.2	确定装配方法与装配的组织形式	(278)
7.4.3	划分装配单元, 确定装配顺序	(279)
7.4.4	装配工序的划分与设计	(281)
7.4.5	填写装配工艺文件	(281)
7.4.6	制定产品检测与试验规范	(284)
7.5	机器结构的装配工艺性	(284)
7.5.1	机器结构应能分成独立的装配单元	(284)
7.5.2	减少装配的修配和机械加工	(285)
7.5.3	机器结构应便于装配和拆卸	(286)
7.6	机器装配自动化	(287)
7.6.1	自动化装配与装配机器人	(288)
7.6.2	装配自动线	(289)
	习题 7	(289)
第 8 章	现代制造技术的发展与前沿	(291)
8.1	概述	(291)
8.1.1	现代制造技术的发展过程	(291)
8.1.2	现代制造技术的产生及特点	(292)
8.1.3	现代制造技术的内容	(293)
8.2	难加工材料的特种加工	(294)
8.2.1	基本概念	(294)
8.2.2	电火花加工	(295)
8.2.3	电解加工	(298)
8.2.4	超声加工	(298)
8.2.5	激光加工	(299)
8.2.6	电子束加工	(301)
8.2.7	离子束加工	(302)
8.3	超精密加工技术	(303)
8.3.1	概述	(303)
8.3.2	精密和超精密加工方法	(304)
8.3.3	微细加工技术	(308)
8.3.4	纳米技术	(310)
8.4	机械制造系统的自动化与计算机辅助制造技术	(310)
8.4.1	机械制造系统自动化	(310)
8.4.2	成组技术	(312)
8.4.3	柔性制造系统	(316)
8.4.4	计算机集成制造系统	(319)
	习题 8	(320)

绪 论

0.1 机械制造工艺学的主要研究内容

0.1.1 制造业的地位和作用

制造是人类社会发展的基础，也促进了人类社会的发展。从石器、陶器的制作，到蒸汽机、内燃机的发明，再到现在的集成电路、纳米技术的应用，全都离不开制造。人类活动的水平极大程度地受到制造水平的约束。所以，制造业的发展水平是一个国家工业化程度发展进程的重要标志，其关键所在是制造工艺的发展和创新。这是一个永恒的主题，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是国家经济与国防实力的综合体现，是国家工业化的关键。

任何机械都是由零件组成的。其中，轴、套、箱体、活塞、连杆、齿轮、螺杆、凸轮等零件可由不同材料经毛坯成型、机械加工（达到图纸规定的结构几何形状和质量要求）、组件、部件和装配过程而完成，最终满足产品的性能要求。虽然各种机械产品的用途和零件结构的差别很大，但其制造工艺的共同性，决定了机械零件冷加工和装配工艺中具有共性规律，这就是机械制造工艺学所要研究的内容，也是人类长期生产实践和科学研究成果的积累和总结。工艺研究与发展产品品种、保证和提高产品质量、提高生产效率、节约能源和降低原材料消耗、取得更大的技术经济技术效益及改善企业管理有着十分密切的关系。要解决好机械制造工艺问题，应从“优质、高产、低消耗”（即质量、生产率、经济性）三个方面的指标来评价。

工艺管理可把生产过程按一定的规律组织生产,以最有效的手段和尽可能低的成本制造出符合质量要求的产品。工艺管理是工程技术科学,侧重于工艺性分析、产品工艺方案制定、工艺规程编制、新工艺的应用与推广等;它通过采用新工艺、新材料而获得因为节约材料、能源、工时等所产生的经济效益,这是发展生产力的最直接因素。全面质量管理要求在制造过程中,对人、机、料、法(工艺方法)、环(环境条件)等因素处在有数据反馈的控制状态中,经过PDCA(Plan-Do-Check-Action)循环,达到稳定与提高产品质量的目的。

机械制造,工艺为本——这就要求必须有正确的理论指导。机械制造工艺学就是为揭示机械制造过程的物理本质与规律而产生的科学。概括而言,它是研究如何科学、最优地生产各种技术装备的一门技术科学,即研究在制造中优质、高产、低耗地生产机械装备的原理和方法。其中的工艺技术水平最终要体现在装备水平上,这是对机械制造实践过程的经验总结和规律应用。抓住机械制造工艺这个根本,才能发展和提高制造业的水平。

0.1.2 制造技术的发展现状

制造技术的发展,目前主要表现在以下几个方面。

(1) 制造系统的集成技术和系统技术是制造研究的热点,主要集中于单元系统和专门技术的研究,除控制技术(数控技术、过程控制和过程监控等)和计算机辅助技术(CAD、CAPP、CAM和CAE等)外,集成技术包括制造系统的信息集成和功能集成技术(CIMS)、过程集成技术(并行工程CE)、企业间集成技术(敏捷制造AM)等;系统技术包括制造系统分析技术、制造系统建模技术、制造系统运筹技术、制造系统管理技术和制造系统优化技术等。

(2) 注重研究制造自动化系统中人的作用。随着实践的深入和无人化工厂的实施失败,人们对“人”在制造自动化系统中不可替代的重要作用进行了重新认识,提出了“人机一体化制造系统”、“以人为中心的制造系统”等新思想,其内涵就是发挥人的核心作用,使人与机器处于优化合作的地位,实现制造系统中人与机器一体化的人机集成决策机制,以取得制造系统的最佳效益。

(3) 单元系统的研究仍占有重要位置。单元系统是以一台或多台数控加工设备和物料储运系统为主体,在计算机统一控制管理下,进行多品种、中小批量零件自动化加工生产的机械加工系统的总称。它是计算机集成制造系统(CIMS)的重要组成部分,也是自动化工厂中,车间作业计划的分解决策层和具体执行机构。

(4) 制造过程的计划和调度研究十分活跃,但罕有实用成果。美国Ingersoll铣床公司曾分析传统制造工厂中从原料进厂到产品出厂的制造全过程。结果表明,对单个零件而言,只有5%的时间被用于机械加工、95%的时间被用于零件的物流运输或等待。优化制造过程的计划和调度就是想方设法减少这95%的时间,这也是提高制造生产率的重要发展方向。

(5) 柔性制造朝深度和广度发展。数控是柔性制造的基础。柔性制造系统(FMS)不仅注重信息流集成,也强调物料流集成与自动化,其运行可靠性依赖于物流自动化设备的正常运行。FMS中,分布式数控(DNC)强调信息集成及其自动化,物料流的控制与执行可大量介入人机交互,具有投资小、见效快、柔性好和可靠性高等特点,因而近年来的研究非常活跃。

(6) 适应现代生产模式的制造环境的研究正在兴起。当前,及时制造生产(Just in Time)、并行工程(Concurrent Engineering)、精良生产(Lean Production)、敏捷制造(Agile Manufacturing)等现代制造模式的提出和研究推动了制造自动化技术研究和应用的发展,适应了现代制造模式

的应用需要。

(7) 底层加工系统的智能化和集成化研究非常活跃。在目前的智能制造系统(IMS)计划中,已经提出智能完备制造系统(HMS),它是由智能完备单元复合而成;其底层设备具有开放、自律、合作、适应柔性、可靠、易集成和鲁棒性好等特性。

0.1.3 制造自动化技术的发展趋势

近年,制造自动化技术的发展趋势可用“六化”来简要描述,即制造全球化、制造敏捷化、制造网络化、制造虚拟化、制造智能化和制造绿色化。制造自动化是一个动态概念,有十分广泛和深刻的内涵。目前制造技术的活跃研究集中在制造系统的集成技术和系统技术、人机一体化制造系统、制造单元技术、制造过程的计划和调度、柔性制造技术和适应现代生产模式的制造环境等研究方面。从历史和现代的角度看待现代制造技术的发展形势,关注制造技术的永恒性和广义制造论及工艺核心论,分析制造工艺技术的核心作用和现代制造工艺理论及技术的发展,是当前机械制造工艺学发展面临的关键。

0.1.4 现代制造技术的特点

制造技术已形成一门科学。现代机械制造工艺学是在系统论、方法论、信息论和协同论等基础上形成制造系统工程学的。这就是广义制造,它体现出制造概念的扩展。广义制造的形成过程主要有:

(1) 制造、设计一体化。体现制造和设计的密切结合,形成设计制造一体化,设计不仅指产品设计,还包括工艺设计、生产调度设计、质量控制设计等。

(2) 材料成型机理的扩展。目前的加工成型机理明确地将加工分为去除加工、结合加工和变形加工。

(3) 制造技术的综合性。现代制造技术是以机械为主体,融会光、电、信息、材料等学科的综合体,并与管理科学、社会科学、文化、艺术、人机工程、生物工程和生命科学等结合,拓展出新领域。

(4) 产品的全生命周期。制造的范畴从过去的设计、加工和装配发展为产品的全生命周期,包括市场调研、设计、制造、销售、维修和报废处理等。

(5) 生产制造模式的发展。计算机集成制造技术是制造与信息结合的产物,集成制造系统强调信息集成,其后出现了柔性制造、敏捷制造、虚拟制造、网络制造、大规模定制、绿色制造、智能制造和协同制造等多种制造模式,有效地提高了制造技术的水平,扩展了制造技术的领域。

信息技术给制造技术带来革命性的变化。机、电、信息一体化是现代制造的基石。机械是主体,电、信息是不可分割的手段,制造技术中的数控技术、传感器技术等是三者结合的典型,三者的结合是数字化制造、数字化社会的技术基础。

先进制造技术是关键。精密和超精密加工、纳米加工、特种加工、极限制造等是当前重点发展的技术关键,有十分重要的地位,也是一个国家制造水平的标志。

分布式制造成为生产制造的主流模式。民用工业、国防工业中的汽车、飞机、导弹、舰船等产品,品种繁多,既有大批量生产,又有单件小批生产,个性化的要求十分强烈。因此多品

种小批量生产的需求突出,生产制造方式要适应多品种小批量生产及个性化要求,分布式制造系统和模式在这种情况下获得了迅速的发展。

绿色制造刻不容缓。环境保护、资源利用和清洁生产,即现代制造业面临的绿色制造,已是亟待解决的大问题,人类再不保护地球就将导致人类最终无生存之地。

0.1.5 制造工艺核心论

1. 工艺是机械制造技术的灵魂、核心和关键

现代制造工艺技术是先进制造工艺技术的核心。产品从设计变为现实,必须经过加工才能完成;工艺是设计和制造的桥梁;设计的可行性会受工艺的制约,工艺(包括检测)也会成为“瓶颈”。因此,工艺方法和水平十分重要。不是所有设计的产品都能加工,也不是所有设计的产品通过加工都能达到预定的技术性能。所以说,工艺和设计同等重要,把它们对立和割裂都是错误的。工艺是制造技术的关键。例如,用金刚石车刀进行超精密切削,其刃口钝圆半径的大小与切削性能关系密切,它影响极薄切削的切屑厚度,刃口钝圆半径的大小往往能反映一个国家的超精密技术水平。通常刃口需在专用的金刚石研磨机上研磨,国外加工的刃口钝圆半径可达 2nm,而我国现在还达不到该水平,至少相差一个数量级。其中,研磨工艺和刃口检测技术都是值得研究的问题。又如集成电路的制造水平常用集成度和最小线条宽度来衡量。现代集成电路在单元芯片上的电子元件数已超过 10^5 ,线宽可达 $0.1\mu\text{m}$ 。这些例子生动地说明了制造技术问题的关键是工艺。

2. 工艺是生产中最活跃的因素

同样的设计可通过不同的工艺方法实现,工艺不同,所用的加工设备、工艺也就不同,其质量和生产率也会有差别。工艺是生产中最活跃的因素。通常,有某种工艺方法才有相应的工具和设备出现;同时,这些工具和设备的发展又提高了该工艺方法的技术性能和水平,扩大了其应用范围。加工技术的发展往往是在工艺上突破。

3. 现代制造工艺理论和技术的发展

20 世纪 50 年代,原苏联学者在德国学者研究的基础上,出版了《机械制造工艺学》《机械制造工艺原理》等著作,在大学开设了机械制造专业,将制造工艺作为一门科学对待,将工艺提高到科学理论的高度来研究。此后,20 世纪 70 年代又形成了机械制造系统和机械制造工艺系统的概念。近年来,制造加工工艺理论和技术的发展很快,除传统制造方法外,因精度、表面粗糙度和表面质量的提高,许多新材料的出现,特别是新型产品的制造生产,如计算机、集成电路(芯片)、印制线路板等,这些与传统制造方法有很大的不同,从而开辟了许多制造工艺的新领域和新方法。这些发展主要可分为工艺理论、加工方法、制造模式、制造技术和系统等几方面。制造工艺理论包括:加工成型机理、精度原理、相似性原理、决策原理和优化原理等若干方面。

1) 加工成型机理

(1) 分层加工,零件的成型方法有分离(去除)、结合(堆积、分层)、变形(流动)等。加工成型的机理已经从分离加工扩展到结合加工,形成了分层加工方法。

(2) 内切削加工。材料的去除加工方式可分为外切削方式和内切削方式。例如,要加工齿轮零件,可用内切削方式先切出齿轮,再将加工材料切开,就可得到上、下模原型,经用其他材料翻制,便可得到齿轮的上、下模,从而可制造齿轮零件。

(3) 刀具材料。它在金属切削和磨削上的发展上最为丰富。刀具材料有硬质合金、人造金刚石、立方氮化硼、陶瓷等系列,以及涂层、多元共渗、气相沉积等工艺,同时有冷却液的湿切削发展到无冷却液的干切削(环保切削)和硬(齿)表面切削等。金刚石刀具与精密加工和超精密加工的发展关系密切,出现了“极薄切削”机理,这为研究超精密加工机理提供了理论基础。

(4) 被加工材料也从金属发展到非金属、高分子材料、半导体、陶瓷和石材等,从而发展出上述多种材料的加工工艺学。

(5) 使用的能源类别。在零件成型上使用的能源有力、电、声、化学、电子、离子、激光等,并发展出电火花加工、超声波加工、化学加工、电子束加工、离子束加工、激光束加工等,因为加工所使用的能源不同,其加工机理也就自然各异。

2) 精度原理

(1) 机械加工遵循的原则:可分为继承性原则和创造性原则等。继承性原则又称为“母性”原则、循序渐进原则或“蜕化”原则。它主要指加工用的工作母机精度应高于所要加工工件的精度。创造性原则又称“进化”原则,可分为直接创造性和间接创造性。直接创造性是利用精度低于工件精度要求的机床,借助工艺手段和特殊工具,加工出精度高于“工作母机”的工件,如“以粗干精”的加工方法就是这个原理,是通过工艺措施来保证加工精度的;“以小干大”原则是指所欲加工工件比机床大,采用工件不动、机床移动进行加工,主要用于大型零件、重型零件的加工。例如,我国上海所建第一条磁悬浮高速列车的轨梁、我国第一个人造空间环境的圆形轨道都是这样加工的。间接创造性是用较低精度的机床和工具,制造出加工精度能满足工件要求的高精度机床和工具,再用这些机床和工具去加工工件,如滚齿机工作台分度蜗轮是影响齿轮加工精度的关键零件,机床厂采用自行研制这一关键设备来解决其加工问题。

(2) 定位原理:提出定位与基准及六点定位原理,其中包括完全定位、不完全定位、欠定位、过定位的判定,定位元件和各种基准的设计。

(3) 尺寸链原理:通过建立尺寸链数学模型,可对线性尺寸链、角度尺寸链、工艺尺寸链和装配尺寸链等进行相应求解及计算机辅助求解的研究。

(4) 质量统计分析原理:针对加工精度等质量问题,应用数理统计学提出分布曲线法和精度曲线法等统计分析方法来分析和控制加工质量,并在此基础上发展了全面质量管理和计算机辅助质量控制等先进质量保证体系。

3) 相似性原理和成组技术

相似性是成组技术的理论基础,成组工艺是成组技术的核心,零件的分类成组方法是成组技术的关键。在形状相似性的基础上提出了派生相似性,即工艺相似性、装配相似性和测量相似性等。针对工艺相似性进行零件的分类成组,提出了生产流程分析法,其中有聚类分析法和编码分类法等。

4) 工艺决策原理

针对工艺决策,提出数学模型决策、逻辑推理决策和智能思维决策等方法,使工艺问题的决策从主观、经验的判定走向客观、科学的判断;同时结合计算机技术,提高判断的正确性和效率。

5) 优化原理

将已有的优化方法应用到工艺问题的优化上,进行单目标和多目标、单工序和多工序的工艺方案优化选择,提高工艺方案的可行性和有效性,降低工艺成本,缩短生产周期。机械加工优化通常是要在保证质量的前提下,达到最高生产率、最低成本或最大利润率。首先确定目标函数,然后选定控制参数,将选定控制参数引入到目标函数的数学模型中进行求解,可得到优化的控制参数。当前,切削用量的多参数优化、多学科综合优化是机械制造工艺学的发展关键和研究重点。

0.1.6 现代制造技术的发展方向

现代制造技术的发展沿着“广义制造”、“大制造”的方向发展。当前,发展的重点是创新设计、并行设计、现代成型与改性技术、材料成型过程仿真和优化、高速和超高速加工、精密工程与纳米技术、数控加工技术、集成制造技术、虚拟制造技术和工业工程等。当前值得发展的制造技术可结合汽车、运载装置、模具、芯片、微型机械和医疗器械等进行高速加工、纳米技术、模块化功能部件、并行工程和数控系统等领域的研究。

0.1.7 机械制造工艺的关键技术和新兴技术

极端制造和精密制造的内容包括极限尺度、极度功能和极端环境三个方面。

(1) 极限尺度包括极大尺度和极小尺度。极大尺度有巨系统制造装备;极小尺度有微型机械、微型机电系统,微纳米加工是当前极小尺度的加工极限境界。由于科学技术的不断发展,具体极限值也随着发展进程而逐渐向前推进。

(2) 极度功能包括极高功能和极多功能,极高功能如当前钢件熔炼轧制连轧机,可从钢铁冶炼开始连续轧制成钢板;极多功能如具有铣、镗、磨的五轴六面体数控加工中心,是当前母机装备的最高水平。

(3) 极端环境包括真空、失重、强场(辐射、磁场)、温度(超高温、超低温)、速度(高速、超高速、高加速、超高加速)、压力(超高压、超低压)、水下、特种气氛等。极端制造的内涵和指标将随着科学技术和工业的发展而不断变化,它是一个国家国力和制造能力的重要标志之一。极端制造和精密制造可归纳为“高、大、精、尖、基、绿”等几方面:

① 生物工程、生命科学和宇航工程等是当前的新兴技术领域,需要机、电、信息技术的支持和结合,体现“高”字。

② 对国计民生影响较大的重大技术设备和成套设备,如电力、冶金、石化、水利、煤炭、纺织等,体现“大”字。

③ 精密工程微纳米技术和虚拟制造技术是当前制造技术的前沿和热点,如集成电路(芯片等)、微型机械、计算机、生物医疗机械、虚拟仪器等,体现“精”字。

④ 尖端科学是国家政治、经济独立的重要标志,也是整个国家科学、技术、教育水平的体现,如原子能(核能)、航天、半导体、生物工程等,体现“尖”字。

⑤ 基础机械主要是基础设备和功能部件,如数控机床、仪器仪表、传感器等,体现“基”字。

⑥ 与资源、环保、生活密切相关,如家用器件、农业机械、林业机械等涉及现代人工作、生活环境和条件,是整个国民经济的基础,体现“绿”字。

要掌握零件制造过程中的共性规律和解决具体工艺问题的知识和能力,其复杂性决不是一门课程所能解决的。例如,毛坯的制造工艺是金属工艺学的范畴;金属切削与磨削过程所用的刀具、磨料与磨具和机床则是切削原理与刀具和金属切削机床的范畴;毛坯与工件的热处理则是金属学与热处理的范畴;而零件的加工与装配质量的标准和检验则又和极限配合与测量技术密切相关。机械制造工艺学,就是上述课程的基础综合,它组成全面地分析和运用机械制造工艺过程的基本内容,形成了机械制造工艺与设备专业的一门主要专业课。

0.2 内容和任务

本课程的学习内容是围绕机械制造工艺问题的三个指标来穿插和安排相应的教学内容。首先是加工质量,没有质量就没数量,也就谈不到生产率和经济性。为满足产品性能和耐用性而提出的零件加工质量有两方面含义,即加工精度和表面质量。前者包括零件的尺寸精度、形状精度和位置精度,后者包括零件的表面完整性(表面粗糙度、波度和物理、机械性能)。

规定零件的加工质量是产品设计师的任务,而在最低成本下达到设计要求则是工艺师的职责。随科学技术的发展和国际市场竞争的白热化,以及采用国际标准的迫切性,我国机械工业对零件的加工质量的要求也越来越高。通过大量的科学实验和生产实践来深入研究加工过程中各种误差因素对加工质量的影响规律,不断改进和创新工艺的方法和手段,是保证产品加工精度和表面质量的重要内容。

机械加工工艺中另两个指标是要求生产时消耗的物质、能源和劳动量要尽量地少,也就是生产率要高,生产成本要低,这就需要对多种工艺方案进行分析与比较、优化和选择。机械零件的装配是整个机械制造过程的最终阶段,它包括安装、调试、检验和试车等环节。近年来在毛坯制造和机械加工方面实现的高度机械化和自动化以及新的工艺方法,大大节省了人力和费用;相比之下,装配工作在整台机械制造中的比重日益增大,所以装配工艺中同样存在质量、生产率和经济性的指标要求。机械制造中的质量、生产率和经济性三者具有密切的辩证关系和灵活性。在解决某一具体工艺问题时,需要全面考虑。例如,提高零件加工精度可以提高互换性,减少钳工修配劳动量,但在采用新工艺方法或装备时,必将牵涉到前后工序的平衡和机床的负荷率。又如,改善零件的结构工艺性可在相同的生产条件和质量要求下提高生产率,但又涉及毛坯制造工艺和原设计零件结构形状的修改,这就需要工艺部门和设计部门联合商讨和协调。工艺部门在完成一台机械的零件加工和装配工艺的全面分析和方案比较、抉择以后,最终将以工艺文件(卡片)的方式记录下来,通常就是工艺规程,供生产准备和车间实施使用。为培养担当这项任务的人才,机械制造工艺学的内容中就要阐明编制工艺规程的原则、步骤和方法,还要通过一些常见的典型零件在不同批量的生产纲领下的实例,传授思考方法、分析途径和决策要点。本课程中还适当地介绍机械制造的新发展,运用系统的观点和计算机作为工具的前瞻,以开阔学生的眼界和思路,为后续的工作学习穿针引线。

0.3 学习方法

综上所述,本课程既是机制专业的一门重要专业课,又是综合多门知识应用到研究、解决

生产实际工艺问题的归结性课程，在内容中反映了理论密切结合实际、分析重于计算，贯穿了质量、生产率和经济性的辩证关系，力图由浅入深、由表及里，强调科学分析、试验验证和择优决策的能力培养，所以大家在学习本课程时要铭记该课程的任务和特点，在学习方法上需要适应。最后要指出的是，学习本课程时必须重视实验、生产实习和现场教学等实践性环节。工艺学是来自生产实践和科学实验的科学，所以工艺工作者就更应注重自我培养发现问题、分析问题、解决问题的方法和手段。

机械制造工艺学是以机械制造中的工艺问题为研究对象的一门应用性制造技术科学，重点研究各种机械的制造过程和方法，主要研究范围是零件的机械加工和产品的装配两部分。在学习的过程中，要始终考虑如何实现零件的加工、毛坯到零件成型的工艺路线——制造工艺、选用的机床和工艺装备——机床工作原理、使用的刀具——刀具的设计与制造、工件的装夹——定位原理、检测的方法、表面完整性（精度和加工表面状态）——加工精度及表面质量；也需要研究切削加工机理和切削加工过程中的现象——优化加工过程、考查机器的装配方法——装配工艺。

当前，尽管我国已是制造大国，但并非制造强国。世界制造中心已经转移到中国，这对中国的制造业是一个机遇和挑战。想形成我们自己的世界制造中心，就必须掌握先进的制造技术和核心技术，才能不受制于人，才能从制造大国变为制造强国！要做到这一点并非易事，要提倡自力更生、自强不息，通过艰苦奋斗、实事求是和与时俱进才能做到。新时代的青年学子，要勇于把握时机，迎接挑战，变被动为主动，使世界制造中心真正成为独立自主而又具有国际水平的制造中心！

第 1 章

机械加工工艺规程的制定

机械制造企业采用各种机械加工方法将毛坯加工成零件，再将这些零件装配成机器。在这一生产过程中，为满足“优质、高产、低消耗”的要求，首先要制订零件的机械加工工艺规程和机器的装配工艺规程，然后按照所制订的工艺规程来进行机械加工和装配。

机械加工工艺规程是规定产品或零部件机械加工工艺过程和操作方法等的工艺文件。制订机械加工工艺规程是机械制造企业工艺技术人员的一项主要工作内容。机械加工工艺规程的制订与生产实际有着密切的联系，它要求工艺规程制订者具有一定的生产实践知识和专业基础知识。

1.1 机械加工工艺过程基本概念*

1.1.1 生产过程与工艺过程

机器的生产过程是指将原材料转变为成品的全过程。一台产品的生产过程包括的内容如下：

- (1) 原材料或半成品、元器件、标准件、工具、工装、设备等的购置、运输、检验、保管；
- (2) 生产准备工作，如编制工艺文件、专用工装及设备的设计与制造等；
- (3) 毛坯制造；

* 本章前三节所用的术语及其定义采用国家标准 GB/T 4863—2008 《机械制造工艺基本术语》。

- (4) 零件的机械加工及热处理;
- (5) 产品装配与调试、性能试验以及产品的包装、发运等工作。

生产过程可以是指整台机器的制造过程，也可以指某一部件或零件的制造过程。一个工厂将进厂的原材料制成该厂的产品的过程即为该厂的生产过程，它又可分为若干个车间的生产过程。某个车间的成品可能是另一个车间的原材料。例如，毛坯制造车间的成品是金工车间的原材料，而金工车间的成品又是装配车间的原材料。对机械制造而言，产品的生产过程是指从原材料或半成品到成品制造出来的各有关劳动过程的总和。

生产过程往往由许多工厂或工厂的许多车间联合完成，这有利于专业化生产，提高生产率、保证产品质量、降低生产成本。

在生产过程中，改变生产对象的形状、尺寸、相对位置或性质等，使其成为成品或半成品的过程，称为工艺过程。其他过程则称为辅助过程，如运输、保管、动力供应、设备维修等。

工艺就是制造产品的方法。工艺过程包括毛坯制造工艺过程、热处理工艺过程、机械加工工艺过程、装配工艺过程等。本章主要讨论机械加工工艺过程。

1.1.2 机械加工工艺过程的组成

用机械加工的方法直接改变毛坯形状、尺寸和机械性能等，使之变为合格零件的过程，称为机械加工工艺过程。机械加工工艺过程往往是比较复杂的，在工艺过程中，需要根据被加工零件的结构特点和技术要求在不同的生产条件下采用不同的加工方法及其加工设备，并通过一系列加工过程使毛坯成为零件。例如，小批生产螺钉零件（如图 1-1 所示）的机械加工工艺过程可按表 1-1 进行安排，工件的毛坯为圆棒料。

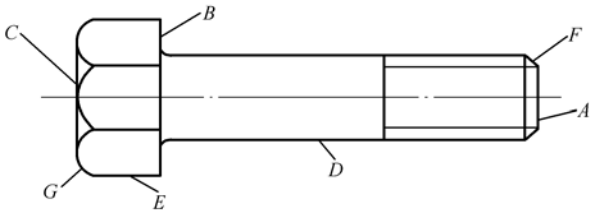


图 1-1 螺钉零件

表 1-1 小批生产螺钉零件的机械加工工艺过程

工 序	安 装	工 步	工 位	走 刀
Ⅰ 车	1 (三爪定心卡盘)	(1) 车端面 A	1	1
		(2) 车外圆 E		1
		(3) 车螺纹外径 D		3
		(4) 车端面 B		1
		(5) 倒角 F		1
		(6) 车螺纹		6
		(7) 切断		1
Ⅱ 车	1 (三爪定心卡盘)	(1) 车端面 C	1	1
		(2) 倒角 G		1

续表

工 序	安 装	工 步	工 位	走 刀
Ⅲ铣	1 (旋转夹具)	(1) 铣六方 (2) 去毛刺	3	3

由上例可以看出，零件的机械加工工艺过程由若干个按一定顺序排列的工序组成。一个工序可能有几个安装，一个安装可能有几个工位，一个工位可能有几个工步，如此等等。毛坯依次通过这些工序即成为成品。为了便于深入细致地分析工艺过程，必须研究其组成并进行科学的定义。

1. 工序

一个或一组工人，在一个工作地对同一个或同时对几个工件所连续完成的工艺过程，称为工序。

区分工序的主要依据是工人和工作地点固定，工作对象不变，工作连续。只要其中任意一个因素发生变动，就应视为不同的工序。因此，对于同一个零件，同样的加工内容可以有不同的工序安排。

例如，加工如图 1-2 所示的阶梯轴，其加工内容包括：①加工小端面；②对小端面钻中心孔；③加工大端面；④对大端面钻中心孔；⑤车大端外圆；⑥对大端倒角；⑦车小端外圆；⑧对小端倒角；⑨铣键槽；⑩去毛刺。这些加工内容可安排在 5 道工序中完成，见表 1-2；也可安排在 3 道工序中完成，见表 1-3。当然也还可以有其他安排。工序安排和工序数目的确定与零件的技术要求、生产规模以及现有工艺条件等有关。

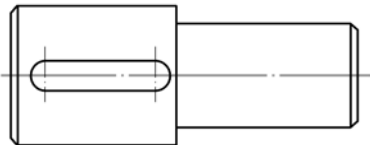


图 1-2 阶梯轴

表 1-2 大批大量生产工艺过程

工 序 号	工 序 内 容	设 备
1	铣两端面，打中心孔	专用机床
2	车大外圆及倒角	车床
3	车小外圆及倒角	车床
4	铣键槽	铣床
5	去毛刺	钳工台

表 1-3 单件小批生产工艺过程

工 序 号	工 序 内 容	设 备
1	车一端面，打中心孔；掉头车另一端面，打中心孔	车床
2	车大外圆及倒角；调头车小外圆及倒角	车床
3	铣键槽、去毛刺	铣床

工序是组成工艺过程的基本单元，也是制订生产计划、进行经济核算的基本单元。工序又可细分为安装、工位、工步、走刀等组成部分。

2. 安装

将工件在机床上或夹具中定位、夹紧的过程称为装夹。显然，装夹包括定位和夹紧两过程。工件（或装配单元）经一次装夹后所完成的工序称为安装。

例如表 1-3 中的第 1 道工序，若对工件的两端连续进行车端面、钻中心孔，就需要两次安装分别进行加工。需要注意的是，在同一工序中，安装次数应尽量少，这样一方面可以提高生产效率，另一方面可以减少由于多次安装带来的加工误差。

3. 工位

为了完成一定的工序部分，一次装夹工件后，工件（或装配单元）与夹具或设备的可动部分一起相对刀具或设备的固定部分所占据的每一个位置称为工位。简而言之，工位是指在一次装夹中，工件（或装配单元）在机床上所占的每个位置上所完成那一部分工艺内容。采用多工位加工，可提高生产率和保证被加工表面的相互位置精度。如图 1-3 所示立轴式回转工作台有四个工位，在一次装夹中可同时进行钻孔、扩孔和铰孔的加工。

可以看出，如果一个工序只有一个安装，并且该安装中只有一个工位，则工序内容就是安装内容，也是工位内容。

4. 工步

在加工表面（或装配时的连接表面）和加工（或装配）工具不变的情况下所连续完成的工序，称为工步。

在同一个工位上，要完成不同的表面加工时，其中加工表面、切削速度、进给量和加工工具都不变的情况下，所连续完成的工位内容称为一个工步。而由人和（或）设备连续完成的工序，该部分工序不改变工件的形状、尺寸和表面粗糙度，但它是完成工步所必需的，称为辅助工步，如更换刀具等。

工步是构成工序的基本单元，其实质是工序的加工内容。

为了提高生产率，常用复合刀具或几把刀具同时加工几个表面，这样的工步称为复合工步，如图 1-4 所示为用钻头和车刀同时加工内孔和外圆的复合工步。

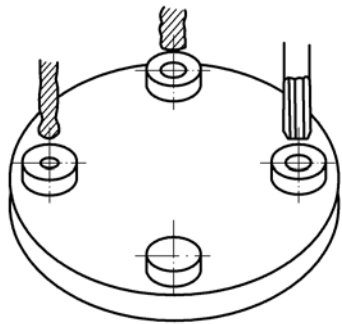


图 1-3 多工位加工

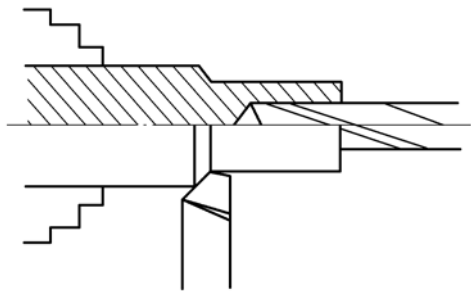


图 1-4 复合工步

5. 工作行程

刀具以加工进给速度相对工件所完成一次进给运动的工步部分称为工作行程，在生产中也常称为走刀。显然，走刀就是切削刀具在加工表面上切削一次所完成的工步内容。每个工步可包括一次走刀或几次走刀。如果需要切除的金属层很厚，不能在一次走刀下切完，则需要分几次走刀。

1.1.3 生产类型及其工艺特点

机械产品制造工艺过程取决于企业的生产类型，而企业的生产类型又由企业的生产纲领决定。

1. 生产纲领

生产纲领是指企业在计划期内应当生产的产品产量和进度计划。计划期常定为一年，因此生产纲领有时也称年产量。零件的生产纲领包括备品和废品在内的年产量，可由式（1-1）计算：

$$N=Q \cdot n(1+\alpha)(1+\beta)$$
 (1-1)

式中， N 为零件的年生产纲领； Q 为产品的年产量； n 为每台产品中该零件的数量； α 为备品率； β 为废品率。

2. 生产类型

生产类型对工厂的生产过程和生产组织起决定性的作用。生产类型是指企业（或车间、班组、工作地）生产专业化程度的分类，一般分为大量生产、成批生产和单件生产三种类型。

（1）单件生产：产品品种繁多，每种产品仅生产一件或数件，工作地的加工对象经常改变。重型机器、大型船舶的制造和新产品的试制属于这种生产类型。

（2）成批生产：产品品种较多，同一产品分批生产。通用机床的制造往往属于这种生产类型。一次投入生产的同一产品（或零件）的数量称为生产批量。根据批量的大小，成批生产又可分为小批生产、中批生产、大批生产。就工艺过程的特点而言，小批生产与单件生产类似，大批生产与大量生产类似。

（3）大量生产：产品品种单一而固定，工作地长期进行一个零件某道工序的加工。汽车、拖拉机、轴承、缝纫机、自行车等的制造属于这种生产类型。

各种生产类型的工艺过程特点见表 1-4。表 1-5 所列是按零件生产纲领和零件的复杂程度划分的生产类型。零件型别可参考表 1-6 按机械产品类别与零件重量予以确定。

可以看出，同一产品的生产，由于生产类型的不同，其工艺方法完全不同。生产同一产品，若其生产类型为大量生产，则一般具有生产效率高、成本低、质量可靠、性能稳定等优点，因此应大力推广产品结构的标准化、系列化，以便于组织专业化的大批量生产，提高经济效益。当前机械制造工艺的一个重要发展方向就是推行成组技术，采用数控机床、柔性制造系统（FMS）和现代集成制造系统（CIMS）等现代化的生产手段和方法，实现机械产品多品种、小批量的自动化生产。

表 1-4 各种生产类型的工艺过程特点

特 点 \ 类 型	单 件 生 产	成 批 生 产	大 量 生 产
加工对象	经常改变	周期性改变	固定不变
毛坯的制造方法及加工余量	铸件用木模、手工造型；锻造用自由锻。毛坯精度低，加工余量大	部分铸件用金属模，部分锻件采用模锻。毛坯精度中等，加工余量中等	铸件广泛采用金属模机器造型。锻件广泛采用模锻以及其他高生产率的毛坯制造方法。毛坯精度高，加工余量小
机床设备及其布置形式	采用通用机床。机床按类别和规定大小采用“机群式”排列布置	采用部分通用机床和部分高生产率的专用机床。机床设备按加工零件类别分“工段”排列布置	广泛采用高生产率的专用机床及自动机床。按流水线形式排列布置
工艺装备	多用标准夹具，很少采用专用夹具，靠画线及试切法达到尺寸精度；采用通用刀具与万能量具	广泛采用专用夹具，部分靠画线进行加工；较多采用专用刀具和专用量具	广泛采用先进高效夹具，靠夹具及调整法达到加工要求；广泛采用高生产率的刀具和量具
对操作工人的要求	需要技术熟练的操作工人	操作工人需要一定的技术熟练程度	对操作工人的技术要求较低，对调整工人的技术要求较高
工艺文件	有简单的工艺过程卡片	有较详细的工艺规程，对重要零件需编制工艺卡片	有详细编制的工艺文件
零件的互换性	广泛采用钳工修配	零件大部分有互换性，少数用钳工修配	零件全部有互换性，某些配合要求很高的零件采用分组互换
生产率	低	中等	高
单件加工成本	高	中等	低

表 1-5 年生产纲领与生产类型的关系

生 产 类 型		零件年生产纲领（件/年）		
		轻 型 零 件	中 型 零 件	重 型 零 件
单件生产		<100	<10	<5
成批生产	小批	100~500	10~200	5~100
	中批	500~5 000	200~500	100~300
	大批	5 000~50 000	500~5 000	300~1 000
大量生产		>50 000	>5 000	>1 000

表 1-6 几种机械产品与零件重量型别

机械产品类别	零件重量（kg）		
	轻 型 零 件	中 型 零 件	重 型 零 件
电子工业机械	<4	4~30	>30
机床	<15	15~50	>50
重型机械	<100	100~2 000	>2 000

表 1-8 机械加工工序卡

(工厂名)	机械加工工序卡片	产品型号	零件图号				共 页		
		产品名称	零件名称	第 页					
		车间	工序号	工序名称					
		毛坯种类	毛坯外形尺寸	每毛坯可制件数					
		设备名称	设备型号	设备编号					
		夹具编号	夹具名称	切削液					
		工位器具编号	工位器具名称	工序工时					
				准终		单件			
工步号	工步内容	工步设备	主轴转速 (r/min)	切削速度 (mm/min)	进给量 (mm/r)	背吃刀量 (mm)	进给次数	机动	辅助
						设计日期	审核日期	标准化日期	会签日期
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期

表 1-9 机械加工工序卡

(工厂名)				机械加工工艺卡片			产品型号		产品名称		零 (部) 件图号		零 (部) 件名称		共 页		
材料牌号				毛坯种类		毛坯外形尺寸		切削用量		每毛坯件数		设备名称及编号		每台件数		备注	
工序	装夹	工步	工序内容	同时加工零件数	背吃刀量 (mm)	切削速度 (m/min)	每分钟转数或往复次数	进给量 (mm 或 mm 双行程)	设备名称及编号	夹具	刀具	量具	技术等级	工时定额	单件	准终	
标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期	编制日期	审核日期	会签日期					

机械加工工艺规程是在总结实践经验的基础上,依据科学的理论和必要的工艺试验制定的,反映了加工中的客观规律。因此,机械加工工艺规程是指导工人操作和用于生产、工艺管理工作的主要技术文件,又是新产品投产前进行生产准备和技术准备的依据以及新建、扩建车间或工厂的原始资料。

机械工艺规程是经过认真讨论和严格逐级审批的,因而也是工厂生产中的工艺纪律,有关人员必须严格执行。但机械加工工艺规程也不是一成不变的,所有的机械加工工艺规程几乎都必须经过不断的修改与补充,及时吸取合理化建议、技术革新成果、新技术和新工艺,才能得以完善。

1.2.2 制定工艺规程的原则、原始资料及步骤

1. 制定原则

为了使产品优质、高产、低消耗地进行生产,编制工艺规程时应遵循以下原则:

1) 技术上的先进性

编制工艺规程时,要充分利用工艺方面的最新科学技术成就,广泛采用国内外先进经验。若受本企业生产条件和资金等方面的限制暂时不能采用先进工艺和技术,应有明确规划,并在现有条件下保持工艺规程尽可能高的技术先进性。

2) 技术上的可行性

编制工艺规程要从本厂实际条件出发,充分利用现有设备,根据企业活力消除生产中的薄弱环节。由于工艺的灵活性较大,一定要照顾到工序间生产能力的平衡。

3) 经济上的合理性

在一定生产条件下,要对多种工艺方案进行对比,尤其是产品的关键件、复杂件的工艺方案,在通过核算和方案评比的基础上,选择能保证质量而经济上最合理的工艺方案。

4) 劳动条件的良好性

为使工人从繁重的体力劳动中解放出来,应尽量采用程控、数控、数显等先进技术。在配备工装时应尽可能采用电、液、气动夹具。

2. 原始资料

制定工艺规程时,一般应具备以下资料:

(1) 被加工零件的零件图,包括必要的部件图和总装图。

(2) 零件的验收质量标准。

(3) 零件的生产纲领和投产批量。

(4) 毛坯材料和毛坯生产条件。

(5) 现有的生产条件和资料,包括设备的规格、数量、性能、精度等级,以及工人的技术水平、专用设备和工装的设计制造能力等。

(6) 国内外同类产品的有关工艺资料。

(7) 各种相关手册、标准及指导性文件。

3. 制定步骤

根据以上资料,并遵循工艺规程制定基本原则,按以下步骤制定机械加工工艺规程。

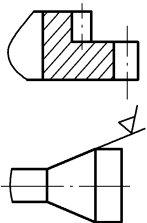
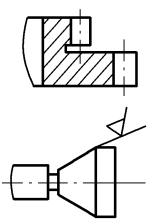
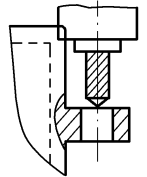
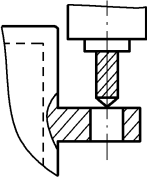
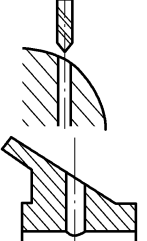
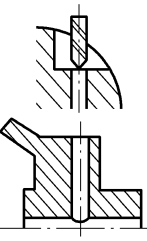
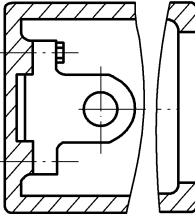
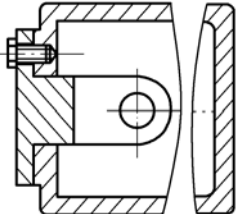
1) 研究产品的装配图和零件图，进行工艺分析

了解产品的用途、性能和工作条件，熟悉零件在产品中的地位和作用；审查图纸上的尺寸、视图和技术要求是否完整、正确、统一；找出主要技术要求和分析关键的技术问题；审查零件的结构工艺性。

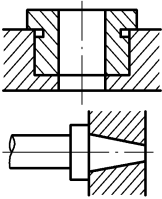
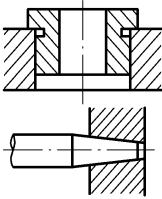
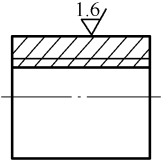
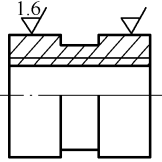
零件结构工艺性是指零件在能满足设计功能和精度要求的前提下，制造的可行性和经济性。零件的结构设计必须考虑到加工时的装夹、对刀、测量和切削效率。结构工艺性不好会使加工困难，浪费工时，有时甚至无法加工。工艺性可行与否同生产类型密切相关。如果发现零件的加工工艺性较差或生产成本较高，应与有关设计人员共同研究，进行必要的修改。如表 1-10 所示，使用性能完全相同的零件，因结构稍有不同，其制造成本就有很大的差别。

归纳起来，可从以下几个方面来分析用机械加工工艺方法制作的零件的结构工艺性：

表 1-10 零件机械加工结构工艺性的对比

结构工艺性差	结构工艺性好	说 明
		一个零件上的两相邻表面间应留有退刀槽、越程槽和让刀孔，以便在加工中进刀和退刀
		钻、镗孔时，应使刀具顺利地接近待加工表面
		钻孔表面应与孔的轴线垂直，否则会引起两边切削力不等，致使钻孔轴线倾斜或打断钻头，设计时应尽量避免钻孔表面是斜面或圆弧面
		零件外表面比内表面的加工方便容易，应尽量将加工表面放在零件外部。如果不能把内表面加工转化为外表面加工，应简化内表面形状

续表

结构工艺性差	结构工艺性好	说 明
		配合面的数目要尽量少，这样可降低零件精度，使制造容易、装配方便
		减少零件的加工表面面积，可降低刀具消耗，减少装配时的修配工作量，并能保证配合表面接触良好

- (1) 零件应由一些简单或者有规律的表面，如平面、回转面、螺旋面、渐开线面等组成，避免奇异无规律的表面，否则将给加工带来困难。
- (2) 零件表面的有关尺寸应标准化和规格化。例如，孔、螺纹、轴径等的尺寸标准化、规格化，可采用标准刀具加工，也便于与标准件配合和便于加工、装配及用户的使用。
- (3) 零件有关表面形状应与加工刀具形状相适应，否则将增加加工难度。
- (4) 尽量减小加工面积。这样既减少了加工工作量，又保证接触良好。
- (5) 零件的结构应保证加工时刀具的引进和退出。
- (6) 零件的结构应能尽量减少加工时的装夹以及换刀次数。
- (7) 不需要加工的毛坯表面不要设计成加工面，要求不高的面不要设计成精度高、粗糙度值小的表面。
- (8) 应能定位准确、夹紧可靠，以便于加工，便于测量。
- 2) 确定生产类型
- 制定工艺规程时，必须首先根据零件的生产纲领确定其生产类型，才能使制定的工艺规程与生产类型相适应，以取得良好的经济效益。
- 3) 熟悉或确定毛坯
- 毛坯的形状和尺寸越接近成品零件即毛坯精度越高，则零件的机械加工劳动量越小，材料消耗越少，因而机械加工的生产率提高，成本降低。但这样可能造成毛坯制造费用的提高。应根据零件的材料及机械性能、零件的结构形状及外形尺寸、生产纲领和生产条件等多方面因素综合考虑毛坯种类及其制造方法。
- 4) 拟定工艺路线
- 拟定工艺路线即制订出全部加工从粗到精的加工工序。其主要内容包括选择定位基准、定位夹紧方法及各表面的加工方法、安排加工顺序等。这是关键性的一步，一般需要提出几个方案进行分析比较。
- 5) 确定各工序的加工余量，计算工序尺寸及其公差
- 6) 选择各工序使用的机床设备及工艺装备
- 选择机床设备的原则如下：

- (1) 机床的主要规格尺寸应与被加工零件的外形轮廓尺寸相适应;
- (2) 机床的精度应与工序要求的加工精度相适应;
- (3) 机床的生产率应与被加工零件的生产类型相适应;
- (4) 机床的选择应适应工厂现有的设备条件。

如果需要改装或设计专用机床,应提出设计任务书,阐明与加工工序内容有关的参数、生产率要求,保证零件质量的条件以及机床总体布置形式等。

选择工艺装备,即确定各工序所用的刀具、夹具、量具和辅助工具等。

(1) 夹具的选择。单件小批生产,应尽量选用通用工具,如各种卡盘、虎钳和回转台等,为提高生产率可积极推广和使用成组夹具或组合夹具。大批大量生产可采用高效的液压、气动等专用工具。夹具的精度应与工件的加工精度要求相适应。

(2) 刀具的选择。一般采用通用刀具或标准刀具,必要时也可采用高效复合刀具及其他专用刀具。刀具的类型、规格和精度应符合零件的加工要求。

(3) 量具的选择。单件小批量生产应采用通用量具,大批大量生产应采用各种量规和一些高效的检验工具。选用的量具精度应与零件的加工精度相适应。

如果需要采用专用的工艺装备,应提出设计任务书。

另需注意的是,机床设备和工艺装备的选择不仅要考虑设备投资的当前效益,还要考虑产品改型及转产的可能性,应使其具有足够的柔性。

7) 确定切削用量及时间定额

应当从保证工件加工表面的质量、生产率、刀具耐用度以及机床功率等因素来考虑选择切削用量。而时间定额目前主要是按经生产实践积累起来的统计资料确定的。

8) 填写工艺文件

1.3 制定机械加工工艺过程的主要问题

1.3.1 确定毛坯

选择毛坯,主要是确定毛坯的种类、制造方法及其制造精度。毛坯的形状、尺寸越接近成品,切削加工余量就越少,从而可以提高材料的利用率和生产效率,然而这样往往会使毛坯制造困难,需要采用昂贵的毛坯制造设备,从而增加毛坯的制造成本。所以选择毛坯时应从机械加工和毛坯制造两方面出发,综合考虑以获得最佳效果。

1. 毛坯的种类及选择

毛坯的种类很多,同一种毛坯又有多种制造方法。下面分别进行介绍。

1) 铸件

铸件适用于形状复杂的零件毛坯。根据铸造方法的不同,铸件又分为如下几种。

(1) 砂型铸造的铸件。这是应用最为广泛的一种铸件。它又有木模手工造型和金属模机器造型之分。木模手工造型铸件精度低,加工表面需留较大的加工余量;它生产效率低,适用于单件小批生产或大型零件的铸造。金属模机器造型生产效率高,铸件精度也高,但设备费用高,

铸件的重量也受限制,适用于大批量生产的中小型铸件。

(2) 金属型铸造铸件。这是将熔融的金属浇注到金属模具中,依靠金属自重充满金属铸型腔而获得的铸件。这种铸件比砂型铸造铸件精度高,表面质量和力学性能也好,生产效率也较高,但需要专用的金属型腔模,它适用于大批量生产中的尺寸不大的有色金属铸件。

(3) 离心铸造铸件。这是将熔融金属注入高速旋转的铸型内,在离心力的作用下,金属液充满型腔而形成的铸件。这种铸件晶粒细,金属组织致密,零件的力学性能好,外圆精度及表面质量高,但内孔精度差,且需要专门的离心浇注机,它适用于批量较大的黑色金属和有色金属的旋转体铸件。

(4) 压力铸造铸件。这是将熔融的金属在一定的压力作用下,以较高的速度注入金属型腔内而获得的铸件。这种铸件精度高,可达 IT11~IT13;表面粗糙度值小,可达 $Ra=3.2\sim 0.4\mu\text{m}$;铸件力学性能好。可铸造各种结构较复杂的零件,铸件上各种孔眼、螺纹、文字及花纹图案均可铸出,但需要一套昂贵的设备和型腔模。它适用于批量较大的形状复杂、尺寸较小的有色金属铸件。

(5) 精密铸造铸件。将石蜡通过型腔模压制成与工件一样的蜡制件,再在蜡制工件周围粘上特殊型砂,凝固后将其烘干焙烧,蜡被蒸发而放出,留下工件形状的模样,用来浇铸。精密铸造铸件精度高,表面质量好,一般用来铸造形状复杂的铸钢件,可节省材料,降低成本,是一项先进的毛坯制造工艺。

2) 锻件

锻件适用于强度要求高、形状比较简单的零件毛坯,其锻造方法有自由锻和模锻两种。

自由锻造锻件是在锻锤或压力机上用手工操作而成型的锻件。它的精度低,加工余量大,生产率也低,适用于单件小批生产及大型锻件。

模锻件是在锻锤或压力机上,通过专用锻模锻制成型的锻件。它的精度和表面粗糙度均比自由锻造的好,可以使毛坯形状更接近工件形状,加工余量小。同时,由于模锻件的材料纤维组织分布好,锻制件的机械强度高。模锻的生产效率高,但需要专用的模具,且锻锤的吨位也要比自由锻造的大。它主要适用于批量较大的中小型零件。

3) 焊接件

焊接件是根据需要将型材或钢板焊接而成的毛坯件,它制作方便、简单,但需要经过热处理才能进行机械加工,适用于单件小批生产中制造大型毛坯。其优点是制造简便、加工周期短、毛坯质量小;缺点是焊接件抗振动性差,机械加工前需经过时效处理以消除内应力。

4) 冲压件

冲压件是通过冲压设备对薄钢板进行冷冲压加工而得到的零件,它可以非常接近成品要求,冲压零件可以作为毛坯,有时还可以直接成为成品。冲压件的尺寸精度高。它适用于批量较大而零件厚度较小的中小型零件。

5) 型材

型材主要通过热轧或冷拉而成。热轧的精度低,价格较冷拉的便宜,用于一般零件的毛坯。冷拉的尺寸小,精度高,易于实现自动送料,但价格昂贵,多用于批量较大且在自动机床上进行加工的情形。按其截面形状不同,型材可分为圆钢、方钢、六角钢、扁钢、角钢、槽钢以及其他特殊截面的型材。

6) 冷挤压件

冷挤压件是在压力机上通过挤压模挤压而成的,其生产效率高。冷挤压毛坯精度高,表面

粗糙度值小,可以不再进行机械加工,但要求材料塑性好,主要为有色金属和塑性好的钢材。适用于大批量生产中制造形状简单的小型零件。

7) 粉末冶金件

粉末冶金件是以金属粉末为原料,在压力机上通过模具压制成型后经高温烧结而成。其生产效率高,零件的精度高,表面粗糙度值小,一般可不再进行精加工,但金属粉末成本较高,适用于大批大量生产中压制形状较简单的小型零件。

2. 毛坯的选择

在确定毛坯时应考虑以下因素。

1) 零件的材料及其力学性能

当零件的材料选定以后,毛坯的类型就大体确定了。例如,材料为铸铁的零件,自然应选择铸造毛坯;而对于重要的钢质零件,力学性能要求高时,可选择锻造毛坯。

2) 零件的结构和尺寸

形状复杂的毛坯常采用铸件,但对于形状复杂的薄壁件,一般不能采用砂型铸造;对于一般用途的阶梯轴,如果各段直径相差不大、力学性能要求不高时,可选择棒料做毛坯,倘若各段直径相差较大,为了节省材料,应选择锻件。

3) 生产类型

当零件的生产批量较大时,应采用精度和生产率都比较高的毛坯制造方法,这时毛坯制造增加的费用可由材料减少的费用以及机械加工减少的费用来补偿。

4) 现有生产条件

选择毛坯类型时,要结合本企业的具体生产条件,如现场毛坯制造的实际水平和能力、外协的可能性等。

5) 充分考虑利用新技术、新工艺和新材料的可能性

为了节约材料和能源,减少机械加工余量,提高经济效益,只要有可能,就必须尽量采用精密铸造、精密锻造、冷挤压、粉末冶金和工程塑料等新工艺、新技术和新材料。

3. 确定毛坯时的几项工艺措施

实现少切屑、无切屑加工,是现代机械制造技术的发展趋势。但是由于毛坯制造技术的限制,加上现代机器对零件精度和表面质量的要求越来越高,为了保证机械加工能达到质量要求,毛坯的某些表面仍需留有加工余量。加工毛坯时,由于一些零件形状特殊,安装和加工不大方便,必须采取一定的工艺措施才能进行机械加工。

下面列举几种常见的工艺措施。

1) 工艺搭子的设置

为了便于安装,有些铸件毛坯需铸出凸台,即所谓的工艺搭子,如图 1-5 所示。工艺搭子只在装夹工件时用,零件加工完毕后一般应切除,如果对使用和外观没有影响,也可保留在零件上。

2) 整体毛坯的采用

在机械加工中,有时会遇到如磨床主轴部件中的三瓦轴承、发动机的连杆和车床的开合螺母等零件。为了保证这类零件的加工质量和加工时方便,常做成整体毛坯,加工到一定阶段后再切开,如图 1-6 所示为连杆整体毛坯。

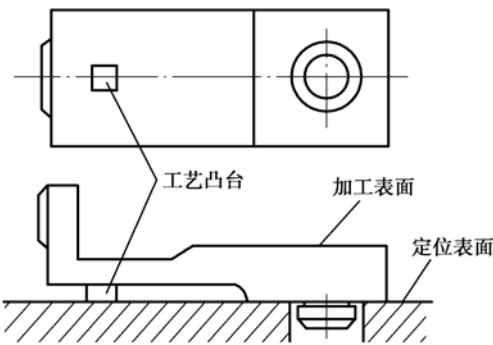


图 1-5 工艺搭子（辅助基准）

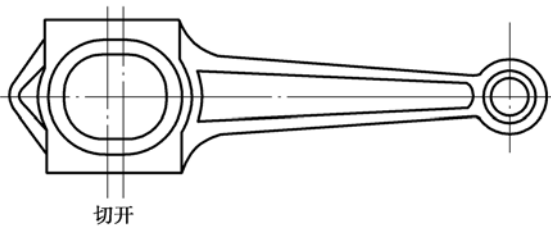


图 1-6 连杆整体毛坯

3) 合件毛坯的采用

为了便于加工过程中的装夹，对于一些形状比较规则的小形零件，如 T 形键、扁螺母、小隔套等，应将多件合成一个毛坯，待加工到一定阶段后或者大多数表面加工完毕后，再加工成单件。图 1-7（a）所示为 T815 汽车上的一个扁螺母，毛坯取一长六方钢；图 1-7（b）所示为在车床上先车槽、倒角；图 1-7（c）所示为在车槽及倒角后，用 $\phi 24.5\text{mm}$ 的钻头钻孔，钻孔的同时也就切成若干个单件。合件毛坯，在确定其长度尺寸时，既要考虑切割刀具的宽度和零件的个数，还应考虑切成单件后，切割的端面是否需要进一步加工，若要加工，还应留有一定的加工余量。

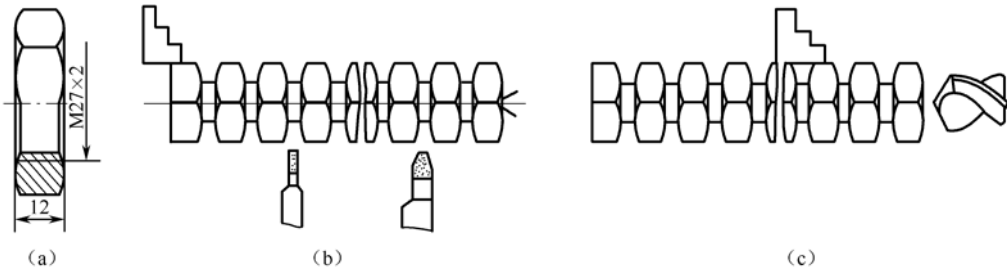


图 1-7 扁螺母整体毛坯及加工

4. 毛坯图的绘制

在确定了毛坯种类、形状和尺寸后，还应绘制一张毛坯图作为毛坯生产单位的产品图样。绘制毛坯图，是在零件图的基础上，在相应的加工表面上加上毛坯余量。但绘制时还要考虑毛坯的具体制造条件，如铸件上的孔、锻件上的孔和空挡、法兰等的最小铸出和锻出条件；铸件和锻件表面的起模斜度（拔模斜度）和圆角；分型面和分模面的位置等。并在毛坯图中用双点画线表示出零件的表面，以区别加工表面和非加工表面。

1.3.2 定位基准选择

定位基准选择合理与否，将直接影响所制定的零件加工工艺规程的质量。若基准选择不当，往往会增加工序，或使工艺路线不合理、夹具设计困难，甚至达不到零件的加工精度特别是位置精度的要求。工艺规程设计人员必须根据零件图的技术要求，从保证零件精度要求的角度出发，合理选择定位基准。

1. 基准的概念与分类

基准是用来确定生产对象上几何要素间的几何关系所依据的那些点、线、面。基准根据其功用的不同可分为设计基准和工艺基准。

1) 设计基准

设计基准是设计图样上所采用的基准,是标注设计尺寸或位置公差起点。例如图 1-7 所示的钻套零件,其中心线 $O-O$ 是各外圆表面和内孔的设计基准,端面 A 是端面 B 、 C 的设计基准,内孔 ϕD 的中心线是外圆 $\phi 40h6$ 的径向跳动和端面 B 的端面圆跳动的设计基准。

2) 工艺基准

工艺基准是在工艺过程中所采用的基准。工艺基准按它的用途不同又可分为测量基准、装配基准、工序基准和定位基准。

(1) 测量基准:为测量时所采用的基准。例如图 1-8 所示零件,当将孔 ϕD 套在测量心轴上测量 $\phi 40h6$ 的径向跳动和端面 B 的端面圆跳动时,内孔 ϕD 就是零件的测量基准。

(2) 装配基准:是指装配时确定零件或部件在产品中的相对位置所采用的基准。例如图 1-9 所示的齿轮,以内孔和左端面确定其安装在轴上的位置,内孔和左端面就是齿轮的装配基准。

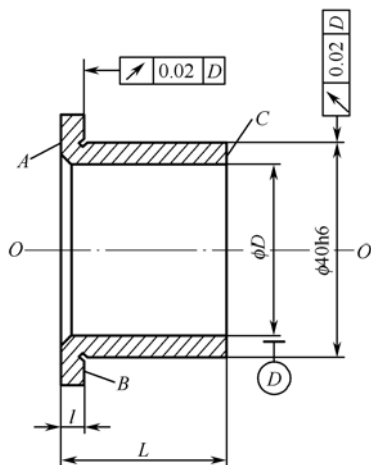


图 1-8 钻套图

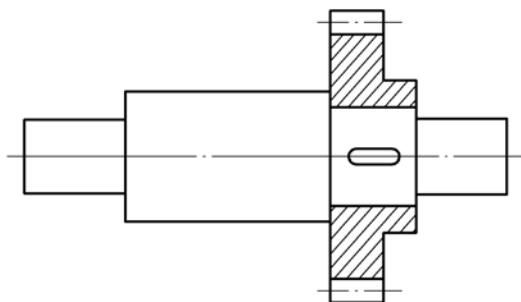


图 1-9 齿轮的装配基准

(3) 工序基准:是指在工序图上用来确定该工序加工表面加工后的尺寸、形状、位置的基准。它是某工序所要达到的加工尺寸(即工序尺寸)的起点。图 1-10 所示为一工件钻孔工序的工序简图,加工表面上的 ϕD 孔,要求其中心线与 A 面垂直,并分别与 C 面和 B 面保持距离 L_1 和 L_2 ,因此表面 A 、 B 、 C 均为本工序的工序基准。

(4) 定位基准:是指在加工中用做定位的基准。当工件以回转表面(圆柱面、圆锥面、球面等)与夹具的定位元件接触(或配合)时,其轴线称为定位基准(如图 1-11(a)所示),工件上的回转面(体现定位基准作用的表面)称为定位基准面;与此对应,定位心轴的圆柱面称为限位基准,心轴的轴线称为限位基准。例如,工件以平面与定位元件接触时(如

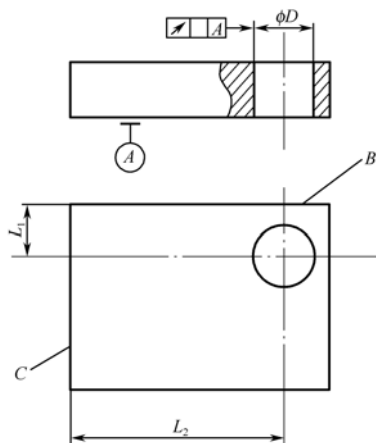


图 1-10 工件钻孔工序简图

图 1-11 (b) 所示), 工件上那个实际存在的面是定位基面, 如果工件的定位基面是精加工过的, 形状误差很小, 可认为定位基面就是定位基准。同样, 定位元件以平面限位时, 若形状误差很小, 也可以认为限位基面就是限位基准。从理论上说, 定位基准应与限位基准重合, 定位基面与限位基面应接触。限制自由度最多的定位基面称为主要定位基面。

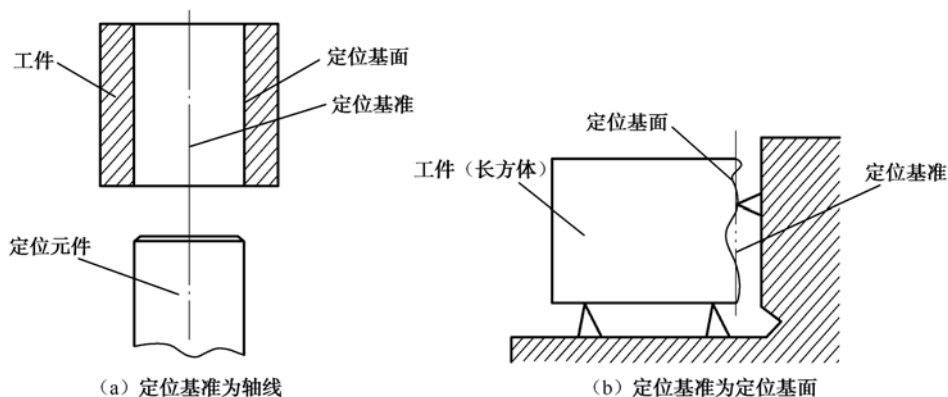


图 1-11 定位基准及定位面

定位基准有粗基准和精基准之分。工件加工的第一道工序中只能选择未加工的毛坯表面作为定位基准, 这种表面称为粗基准; 用加工过的表面作为定位基准称为精基准。

工件定位时, 为了保证加工表面的位置精度, 大多优先选择设计基准或装配基准作为主要定位基准, 这些基准一般为零件上的主要表面。但有些零件在加工中, 为装夹方便或易于实现基准统一, 人为地制造一种定位基准, 即辅助基准。所谓辅助基准, 是指为满足工艺需要, 在工件上专门设计或加工出的定位表面。

如图 1-4 所示的零件, 加工底面用上表面定位, 但上表面太小, 工件呈悬臂状态, 受力后会有有一定的变形, 为此, 在毛坯上专门铸出了工艺凸台, 和原来的基准齐平。工艺凸台上用做定位的表面不是零件上的工作表面, 只是为满足工艺需要而在工件上专门设计的, 该定位基准称为辅助基准。此外, 某些零件上的次要表面 (非配合表面), 因为工艺上宜作为定位基准而提高其加工精度和表面质量以便定位时使用, 这种表面也称为辅助基准。例如, 丝杠的外圆表面, 从螺纹副的传动来看, 它是非配合的次要表面, 但在丝杠螺纹的加工中, 外圆表面往往作为定位基准, 它的圆度和圆柱度直接影响螺纹的加工精度, 所以要提高外圆的加工精度, 并降低其表面粗糙度值。

分析基准时, 必须注意以下几点:

(1) 基准是制订工艺的依据, 必然是客观存在的。当作为基准的是轮廓要素时, 如平面、圆柱面等, 容易直接接触到, 也比较直观。但是有些作为基准的是中心要素, 如圆心、球心、对称轴线等, 则无法触及, 然而它们也是客观存在的。

(2) 当作为基准的要素无法触及时, 通常由某些具体的表面来体现, 这些表面称为基面。例如, 轴的定位可以用外圆柱面作为定位基面, 这类定位基准的选择则转化为恰当地选择定位基面的问题。

(3) 作为基准, 可以是没有面积的点、线以及面积积极小的面。但是工件上代表这种基准的基面总是有一定接触面积的。

(4) 不仅表示尺寸关系的基准问题如上所述, 表示位置精度的基准关系也是如此。

2. 定位基准的选择原则

在制订机械加工工艺规程时,正确选择定位基准对保证零件的加工精度、合理安排加工顺序、分配加工余量以及选择工艺装备等都有着至关重要的影响。选择定位基准不同,工艺过程也随之而异。

选择定位基准时,总是先考虑选择怎样的精基准把各个主要表面加工出来,然后再考虑选择怎样的粗基准把作为精基准的表面先加工出来,即先考虑精基准的选择,后考虑粗基准的选择。

1) 精基准的选择

选择精基准主要考虑如何保证工件的尺寸精度和位置精度,以及如何使得工件装夹方便可靠。选择精基准,应遵循以下原则。

(1) 基准重合原则:以设计基准为定位基准,避免基准不重合误差。如果加工的是最终工序,所选择的定位基准应与设计基准重合;如果是中间工序,应尽可能采用工序基准作为定位基准。在对加工面位置尺寸和位置关系有决定性影响的工序中,特别是当位置公差要求很严时,也应尽量遵循这一原则,否则将由于存在基准不重合误差而增大加工难度。

(2) 基准统一原则:应尽可能选择在加工工件多个表面时都能使用的定位基准作为精基准。这样便于保证各加工面间的相互位置精度,避免基准变换所产生的误差,并简化夹具的设计和制造。

(3) 互为基准原则:当两个表面相互位置精度以及它们自身的尺寸与形状精度要求都很高时,可以采取互为基准的原则,反复多次进行精加工。例如,车床主轴的主轴颈和前端锥孔的同轴度要求很高,常采用互为基准反复加工的方法。再如图 1-12 所示工件,外圆和内孔自身加工精度和相互位置精度都要求很高,可采用互为基准进行加工。

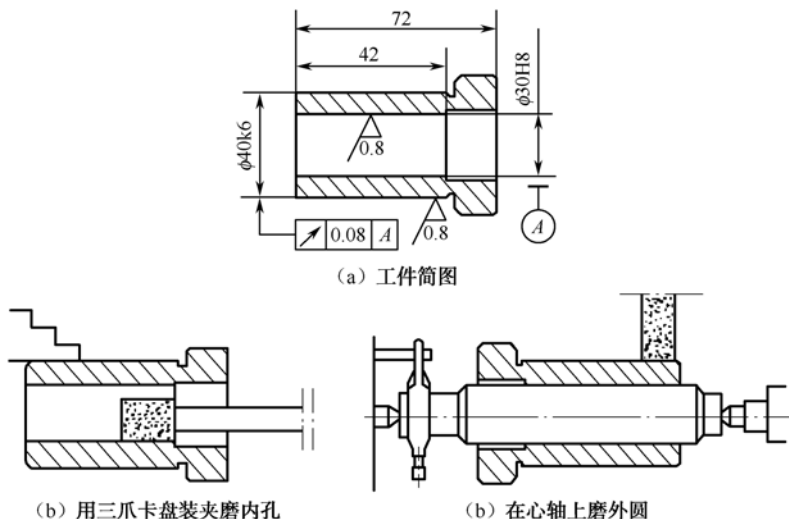


图 1-12 采用互为基准磨内孔和外圆

(4) 自为基准原则:有些精加工或光整加工工序要求余量小而均匀,在加工时就应尽量选择加工表面本身作为精基准,即遵循自为基准的原则,而该表面与其他表面之间的位置精度则由先行的工序保证。如图 1-13 所示,在导轨磨床上磨削床身导轨,由于加工余量小(一般不超过 0.5mm),就以导轨面本身来找正。其方法是在磨头上装上百分表来找正工件导轨面,或者观察火花来找正导轨面,然后加工导轨面保证余量均匀,以满足对导轨面的质量要求。另外如浮动镗孔、浮动铰孔和珩磨等孔加工的方法,也都属于自为基准。

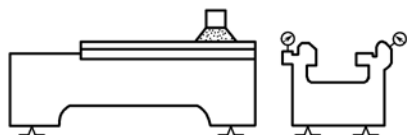


图 1-13 自为基准

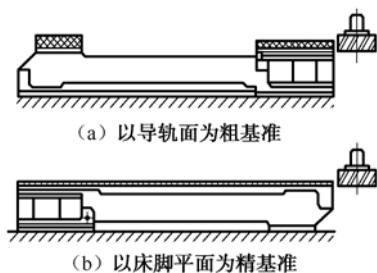


图 1-14 床身导轨面加工的定位方法

必须指出,精基准的选择不能只考虑本工序定位夹紧是否合适,而应结合整个工艺路线统一全面考虑。

2) 粗基准的选择

选择粗基准主要考虑如何保证不加工表面与加工表面间的相互位置精度,以及如何保证各重要加工表面都有足够的加工余量。因此,选择粗基准的基本原则如下。

(1) 若工件必须首先保证某重要表面的加工余量均匀,应选择该表面为粗基准。例如床身导轨面的加工,由于导轨面是床身的主要表面,精度要求高,并且要求耐磨。在铸造床身毛坯时,导轨面需向下放置,以使其表面层的金属组织细致均匀,没有气孔、夹砂等缺陷;加工时要求加工余量均匀,以便容易达到较高的精度,又可使切去的金属层尽可能薄一些,留下组织紧密、耐磨的金属表层。可采用图 1-14 所示的定位方法来加工,即先以导轨面作为粗基面加工床脚平面,再以床脚平面作为精基面加工导轨面,则可保证导轨面的加工余量比较均匀。此时床脚平面上的加工余量可能不均匀,但它不影响床身的加工质量。反之,则会造成导轨面加工余量不均匀。

(2) 在没有要求保证重要表面加工余量均匀的情况下,若零件上每个表面都要加工,则应该以加工余量最小的表面作为粗基准,以避免该表面在加工时因余量不足而留下部分毛坯面,造成工件废品。如图 1-15 所示阶梯轴直径 D_3 余量为 δ_3 , 直径 D_2 的余量为 δ_2 , 当毛坯两外圆柱面毛坯制造偏心量为 $\delta_2 - \delta_3$ 时,若选 D_2 为粗基准加工外圆 D_3 ,有可能因余量不足而使零件报废。

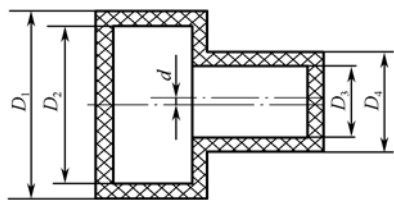


图 1-15 阶梯轴加工的粗基准选择

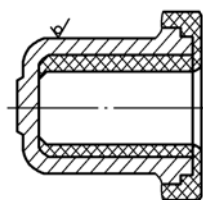


图 1-16 套筒法兰加工粗基准选择

(3) 在与上一项相同的前提条件下,若零件上有些表面无须加工,则应以不加工表面中与加工表面的位置精度要求较高的表面为粗基准,以达到壁厚均匀、外形对称等要求。例如图 1-16 所示的零件,一般为了保证镗内孔后零件壁厚均匀,应选不加工外圆表面作为粗基准。

(4) 选用粗基准的表面应尽量平整光洁,不应有飞边、浇口、冒口及其他缺陷,这样可减小定位误差,并能保证零件夹紧可靠。

(5) 粗基准一般只使用一次。但是当毛坯是精密铸件或精密锻件时,毛坯的质量很高,如果工件的精度要求不高,可以重复使用某一粗基准。

上述粗、精基准选择的各项原则，都是在保证工件加工质量的前提下从不同角度提出的工艺要求和保证的措施，有时这些要求和措施会出现相互矛盾的情况。在制定工艺规程时必须结合具体情况进行全面系统分析，综合考虑，灵活掌握。

1.3.3 工艺路线的拟定

工艺路线的拟定是制定工艺规程中关键的一步。工艺路线合理与否不但影响到零件的加工质量和效率，而且影响工人的劳动强度、设备投资、车间面积、生产成本等问题，因此必须严谨从事。工艺路线的拟定，目前还没有一套精确的计算方法，主要采用生产实践中总结出的一些原则，结合工厂具体情况灵活应用。设计者一般提出几种方案，通过分析比较，从中选择最佳路线。工艺路线的拟定除了上面介绍的定位基准的选择外，主要包括加工方法的选择、加工阶段的划分、加工顺序的安排、工序的组合以及设备与工艺装备的选择等。

1. 加工方法的选择

任何复杂的表面都是由若干个简单的几何表面组合而成的。零件的加工，实质上就是这些简单几何表面加工的组合。因此，在拟定零件的加工工艺路线时，首先要确定构成零件各个表面的加工方法。要达到同样加工质量要求的表面，其加工过程和最终加工方法可以有多个方案。不同的加工方法所达到的加工经济精度和生产率也是不同的。因此，表面加工方法的选择，在保证加工质量的前提下，应同时满足生产率和经济性的要求。

这里提到的加工经济精度，是指在正常的加工条件下（使用符合质量标准的设备、工艺装备和标准技术等级的工人、合理的工时定额）所能达到的加工精度和表面粗糙度。

表 1-11、表 1-12 和表 1-13 分别介绍了机器零件的三种最基本的表面（外圆表面、内孔表面和平面）的较常用加工方案及其所能达到的经济精度和表面粗糙度。

表 1-11 外圆表面加工方案及其经济精度

加 工 方 案	经济精度 公差等级	表面粗糙度 Ra (μm)	适 用 范 围
粗车	IT 11~13	12.5~50	适用于淬火锅以外的各种金属
粗车一半精车	IT 8~10	3.2~6.3	
粗车一半精车—精车	IT 7~8	0.8~1.6	
粗车一半精车—精车—滚压（或抛光）	IT 7~8	0.025~0.2	
粗车一半精车—磨削	IT 7~8	0.4~0.8	主要用于淬火锅，也可用于未淬火锅，但不宜加工有色金属
粗车一半精车—粗磨—精磨	IT 6~7	0.1~0.4	
粗车一半精车—粗磨—精磨—超精加工	IT 5	0.012~0.1	
粗车一半精车—精车—金刚车	IT 6~7	0.025~0.4	主要用于要求较高的有色金属加工
粗车一半精车—粗磨—精磨—镜面磨	IT 5 以上	0.006~0.025	极高精度的外圆加工
粗车一半精车—粗磨—精磨—研磨	IT 5 以上	0.006~0.1	

表 1-12 内孔表面加工方案及其经济精度

加 工 方 案	经济精度 公差等级	表面粗糙度 $Ra(\mu m)$	适 用 范 围
钻	IT 11~13	12.5	加工未淬火钢及铸铁的实心毛坯，也可加工有色金属。孔径小于 15~20mm
钻—铰	IT 8~10	1.6~6.3	
钻—粗铰—精铰	IT 7~8	0.8~1.6	
钻—扩	IT 10~11	6.3~12.5	加工未淬火钢及铸铁的实心毛坯，也可加工有色金属。孔径大于 15~20mm
钻—扩—铰	IT 8~9	1.6~3.2	
钻—扩—粗铰—精铰	IT 7	0.8~1.6	
钻—扩—机铰—手铰	IT 6~7	0.2~0.4	
钻—扩—拉	IT 7~9	0.1~0.6	大批生产
粗镗（或扩孔）	IT 11~13	6.3~12.5	除淬火钢外的各种材料，毛坯有铸出孔或锻出孔
粗镗（粗扩）—半精镗（精扩）	IT 9~10	1.6~3.2	
粗镗（粗扩）—半精镗（精扩）—精镗（铰）	IT 7~8	0.8~1.6	
粗镗（粗扩）—半精镗（精扩）—精镗—浮动镗	IT 6~7	0.4~0.8	
粗镗（扩）—半精镗—磨孔	IT 7~8	0.2~0.8	主要用于淬火钢，也可用于未淬火钢，但不宜用于有色金属
粗镗（扩）—半精镗—粗磨—精磨	IT 6~7	0.1~0.2	
粗镗—半精镗—精镗—金刚镗	IT 6~7	0.05~0.4	主要用于精度要求高的有色金属加工
钻—（扩）—粗铰—精铰—珩磨；钻—（扩）—拉—珩磨；粗镗—半精镗—精镗—珩磨	IT 6~7	0.025~0.2	精度要求很高的孔
以研磨代替上述方法中的珩磨	IT 5~6	0.006~0.1	

表 1-13 平面加工方案及其经济精度

加 工 方 案	经济精度 公差等级	表面粗糙度 $Ra(\mu m)$	适 用 范 围
粗车	IT 11~13	12.5~50	端面
粗车—半精车	IT 8~10	3.2~6.3	
粗车—半精车—精车	IT 7~8	0.8~1.6	
粗车—半精车—磨削	IT 6~8	0.2~0.8	
粗刨（或粗铣）	IT 11~13	6.3~25	一般不淬硬平面，端铣 Ra 值较小
粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）	IT 8~10	1.6~6.3	
粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）—刮研	IT 6~7	0.1~0.8	精度要求较高的不淬硬平面，批量较大时宜采用宽刃精刨方案
粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）—宽刃精刨	IT 7	0.2~0.8	
粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）—磨削	IT 7	0.2~0.8	精度要求高的淬硬平面或不淬硬平面
粗刨（或粗铣）—精刨（或精铣）—粗磨—精磨	IT 6~7	0.025~0.4	
粗铣—拉	IT 7~9	0.2~0.8	大量生产，不淬硬的小平面
粗铣—精铣—磨削—研磨	IT 5 以上	0.006~0.1	高精度平面

必须指出的是,表 1-11、表 1-12 和表 1-13 中各加工方法所对应的表面粗糙度和精度是在一般情况下可能达到的表面粗糙度和精度,在具体条件下是会有差别的。随着生产技术的发展、工艺水平的提高,同一种加工方法所能达到的精度和表面质量也会有所提高。例如,过去在外圆磨床上精磨外圆仅能达到 IT6 的公差和 $Ra \geq 0.20\mu\text{m}$ 的表面粗糙度;但在采用适当的措施提高磨床精度以及改进磨削工艺后,现在已能在普通外圆磨床上进行镜面磨削,可达 IT5 以上精度、 $Ra \geq 0.10 \sim 0.012\mu\text{m}$ 的表面粗糙度。

选择加工方法的具体做法就是根据被加工表面的加工要求、材料性质等,选择合适的加工方法及加工路线。在具体选择时应综合考虑以下问题:

(1) 被加工表面的精度和粗糙度。例如,对于 IT7 级精度的孔,采用拉削、铰削、镗削和磨削等加工方法都可以。但是箱体上的孔一般不用拉或磨,而常常采用铰孔和镗孔;直径大于 60mm 的孔不宜采用钻、扩、铰。

(2) 零件材料的性质及热处理要求。例如,有色金属零件的精加工应采用金刚车或金刚镗等加工方法,而不应采用磨削;钢件和铸铁可采用磨削,而一般淬硬钢零件的精加工只能采用磨削。

(3) 生产率和经济性要求。大批量生产时,应采用高效率的先进工艺,例如,拉削孔与平面,同时加工几个表面的组合铣削或磨削等。而在单件小批生产时,则不应盲目地采用高效率的加工方法及专用设备。

(4) 本厂现有技术水平及生产条件等。应充分利用现有设备和工艺手段,不断引进新技术,对老设备进行技术改造,挖掘企业潜力,提高工艺水平。

此外,选择加工方法还应考虑一些其他因素,如工件的质量以及加工方法所能达到的表面物理机械性能等。

2. 加工阶段的划分

零件的加工工艺路线常划分为几个阶段来进行。

(1) 粗加工阶段:主要任务是切除各加工表面上的大部分加工余量,其关键问题是提高生产率。

(2) 半精加工阶段:主要任务是为主要表面的精加工做好准备(控制精度和适当余量),并完成一些次要表面的加工(如钻孔、攻螺纹、铣键槽等)。

(3) 精加工阶段:主要任务是保证各主要表面达到图样规定要求,主要问题是如何保证加工质量。

(4) 光整加工阶段:主要任务是提高表面本身的精度(表面粗糙度和精度),不纠正几何形状和相互位置误差。常用加工方法有金刚镗、研磨、珩磨、镜面磨、抛光等。

当毛坯余量特别大时,在粗加工阶段前可增加荒加工阶段,一般在毛坯车间进行。

划分加工阶段的原因如下。

1) 保证加工质量

粗加工时切削余量大,切削力、切削热、夹紧力也大,毛坯本身具有内应力,加工后内应力将重新分布,工件会产生较大变形。划分加工阶段后,粗加工产生的误差和变形通过半精加工和精加工予以纠正,并逐步提高零件的精度和表面质量。

2) 及时发现毛坯的缺陷

粗加工时去除了加工表面的大部分余量,当发现有缺陷时可及时报废或修补,避免精加工

工时的损失。

3) 合理使用设备

粗加工可采用精度一般、功率大、效率高的设备；精加工则采用精度高的精密机床。这样可以充分发挥各类机床的效能，延长机床的使用寿命。

4) 便于组织生产

各加工阶段要求的生产条件不同，如精密加工要求恒温洁净的生产环境。划分加工阶段后，可在各阶段之间安排热处理工序。对于精密零件，粗加工后安排去应力时效处理，可减少内应力对精加工的影响；半精加工后安排淬火不仅容易达到零件的性能要求，而且淬火变形可通过精加工工序予以消除。

5) 精加工安排在最后，可防止或减少已加工表面的损伤

应当指出，加工阶段的划分不是绝对的。对于那些刚性好、余量小、加工要求不高或内应力影响不大的工件，如有些重型零件的加工，可以不划分加工阶段。但对于精度要求高的重型零件，仍需划分加工阶段，并插入时效、去内应力等处理。换言之，加工阶段的划分取决于零件的实际加工情况。

3. 工序划分与安排

1) 工序的集中和分散

在制订工艺过程中，为便于组织生产、安排计划和均衡机床的负荷，常将工艺过程划分为若干道工序。划分工序时有两个不同的原则，即工序的集中和工序的分散。

按工序集中原则组织工艺过程，就是使每个工序所包括的加工内容尽量多些，将许多工序组成一个集中工序。最大限度的工序集中，就是在一个工序内完成工件所有表面的加工。工序集中又可分为：采用技术措施集中的机械集中，如采用多刀、多刃、多轴或数控机床加工等；采用人为组织措施集中的组织集中，如普通车床的顺序加工。

按工序分散原则组织工艺过程，就是使每个工序所包括的加工内容尽量少些。最大限度的工序分散，就是每个工序只包括一个简单工步。

工序集中的特点如下：

- (1) 采用高效率的专用设备和工艺装备，生产效率高；
- (2) 减少了装夹次数，易于保证各表面间的相互位置精度，还能缩短辅助时间；
- (3) 工序数目少，机床数量、操作工人数量和生产面积都可减少，节省人力、物力，还可简化生产计划和组织工作；
- (4) 工序集中通常需要采用专用设备和工艺装备，使得投资大，设备和工艺装备的调整、维修较为困难，生产准备工作量大，转换新产品较麻烦。

工艺分散的特点如下：

- (1) 设备和工艺装备简单、调整方便、工人便于掌握，容易适应产品的变换；
- (2) 可以采用最合理的切削用量，减少基本时间；
- (3) 对操作工人的技术水平要求较低；
- (4) 设备和工艺装备数量多、操作工人多、生产占地面积大。

工序集中与分散各有特点，应根据企业的生产规模、产品的生产类型、现有的生产条件、零件的结构特点和技术要求、各工序的生产节拍，进行综合分析后选定。一般来说，单件小批生产采用组织集中，以便简化生产组织工作；大批大量生产可采用较复杂的机械集中；对于结

构简单的产品,可采用工序分散的原则;批量生产应尽可能采用高效机床,使工序适当集中。对于重型零件,为了减少装卸运输工作量,工序应适当集中;而对于刚性较差且精度高的精密工件,则工序应适当分散。随着科学技术的进步、先进制造技术的发展,目前的发展趋势是倾向于工序集中。

2) 工序安排原则

零件经过切削加工成型,中间可能穿插热处理和辅助工序,在拟定工艺路线时必须将三者统筹考虑,合理安排顺序。各工序的安排需遵循如下一些原则。

(1) 切削加工工序顺序的安排原则。

① 基面先行原则:首先加工用做精基准的表面,然后再用精基准定位加工其他表面。例如,对于箱体零件,一般是以主要孔为粗基准加工平面,再以平面为精基准加工孔系;对于轴类零件,一般是以外圆为粗基准加工中心孔,再以中心孔为精基准加工外圆、端面等其他表面。如果有几个精基准,则应该按照基准转换的顺序和逐步提高加工精度的原则来安排基面和主要表面的加工。

② 先主后次原则:零件的主要表面一般都是加工精度或表面质量要求比较高的表面,如装配基面、工作表面等。它们的加工质量好坏对整个零件的质量影响很大,其加工工序往往也比较多,因此应先安排主要表面的加工。次要表面如键槽、紧固用的光孔和螺纹孔等的加工适当穿插在主要表面加工中间或其后进行。

③ 先粗后精原则:在安排加工顺序时,应先集中安排各表面的粗加工,中间根据需要依次安排半精加工,最后安排精加工和光整加工。对于精度要求较高的工件,为了减小因粗加工引起的变形对精加工的影响,通常粗、精加工不应连续进行,而应分阶段、间隔适当时间进行。

④ 先面后孔原则:对于箱体、支架和连杆等工件,由于平面轮廓平整、面积大,应先加工平面再以平面定位加工孔,这样既能保证加工孔时定位稳定可靠,又有利于保证孔与平面间的位置精度要求。

(2) 热处理工序在工艺路线中的安排,主要取决于零件的材料和热处理的目的。热处理工序安排原则如下:

① 为改善金属组织和加工性能的热处理工序,如退火、正火和调质等,一般安排在粗加工前后。安排在粗加工前,可改善材料的切削加工性能;安排在粗加工后,有利于消除残余内应力。

② 为提高金属材料的力学性能,如提高零件的硬度和耐磨性等的热处理工序,如淬火、渗碳淬火等,一般安排在半精加工之后,精加工、光整加工之前。变形较大的热处理,如渗碳淬火、调质等,应安排在精加工前进行,以便在精加工时纠正热处理的变形;变形较小的热处理,如渗氮等,则可安排在精加工之后进行。

③ 为消除内应力、减少工件变形的时效处理工序一般安排在粗加工之后、精加工之前;对于精度要求较高的零件可在半精加工之后再安排一次时效处理;冰冷处理(在 $0\sim-80^{\circ}\text{C}$ 之间的空气中停留 $1\sim 2\text{h}$)一般安排在回火处理之后或者精加工之后或者工艺过程的最后。

④ 为了表面防腐或表面装饰所进行的表面涂镀或发蓝等热处理工序通常安排在工艺过程的最后。

(3) 辅助工序包括工件的检验、去毛刺、清洗、去磁和防锈等。

检验是最主要的辅助工序,它对保证产品质量有重要的作用。检验工序应安排在:

- ① 粗加工阶段结束后；
- ② 转换车间的前后，特别是进入热处理工序的前后；
- ③ 重要工序之前或加工工时较长的工序前后；
- ④ 特种性能检验（如磁力探伤、密封性检验等）之前；
- ⑤ 全部加工工序结束之后。

应该认识到辅助工序也是机械加工的必要工序，如果安排不当或遗漏，会给后续工序和装配带来困难，影响产品质量甚至机器的使用性能。例如，未去毛刺的零件装配到产品中会影响装配精度或危及工人安全，机器运行一段时间后，毛刺变成碎屑后混入润滑油中，将影响机器的使用寿命；用磁力夹紧过的零件如果不安排去磁，则可能将细微切屑带入产品中，也必然会严重影响机器的使用寿命，甚至还可能造成不必要的事故。因此，必须十分重视辅助工序的安排。

1.3.4 加工余量的确定

工艺路线拟定以后，在进一步安排各个工序的具体内容时，应正确地确定工序尺寸及公差，以指导工人进行加工操作，并为工序间的尺寸检查提供依据。工序尺寸的公差与完成该表面加工时所用方法的经济加工精度有关，而工序尺寸大小的确定则与工序间加工余量的选择密切相关。

1. 加工余量的概念

为了使零件得到所要求的形状、尺寸和表面质量，在切削加工过程中，必须从加工表面上切除的金属层厚度称为机械加工余量。余量有加工总余量和工序余量之分。

1) 加工总余量

加工总余量又称毛坯余量，是指毛坯尺寸与零件图的设计尺寸之差，即

$$Z_{\text{总}} = Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_n \quad (1-2)$$

式中， $Z_{\text{总}}$ 为加工总余量； Z_1 、 Z_2 、 \cdots 、 Z_n 为各道工序余量。

2) 工序余量

工序余量是指相邻两工序的工序尺寸之差。按照这一定义，工序余量有单边余量和双边余量之分。零件的非对称结构的非对称表面，其加工余量一般为单边余量，如单一平面的加工余量为单边余量。零件对称结构的对称表面，其加工余量为双边余量，如回转体表面（内、外圆柱表面）的加工余量为双边余量。

(1) 单边余量。

对于外表面，如图 1-17 (a) 所示：

$$Z = a - b \quad (1-3)$$

对于内表面，如图 1-17 (b) 所示：

$$Z = b - a \quad (1-4)$$

式中， Z 为本工序的工序余量； a 为前道工序的工序尺寸； b 为本工序的工序尺寸。

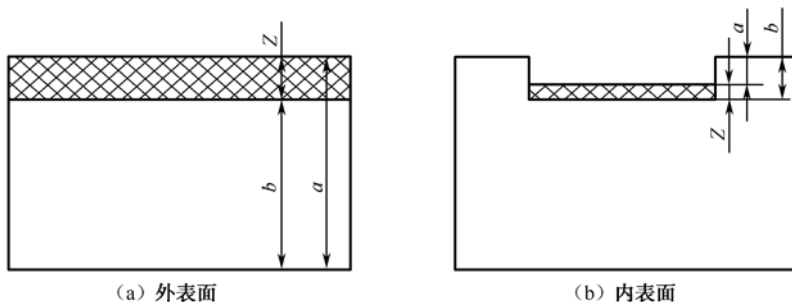


图 1-17 单边余量

(2) 双边余量。旋转表面的工序余量则是对称的双边余量，用 $2Z$ 表示。

对于被包容面，如图 1-18 (a) 所示：

$$2Z = d_a - d_b \quad (1-5)$$

对于包容面，如图 1-18 (b) 所示：

$$2Z = d_b - d_a \quad (1-6)$$

式中， Z 为加工余量； d_a 为前道工序的加工直径； d_b 为本工序的加工直径。

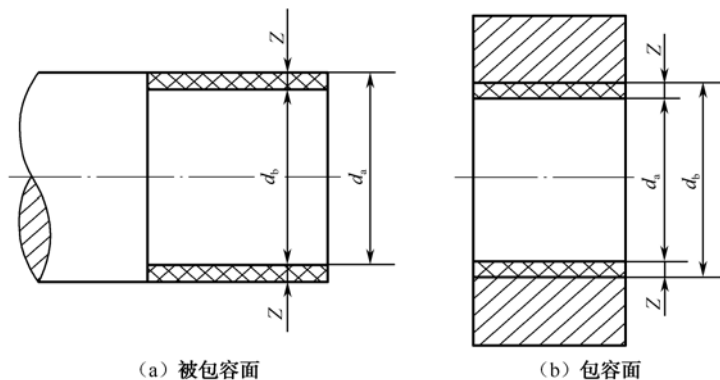


图 1-18 双边余量

由于工序尺寸有公差，所以实际切除的余量大小不等。因此，工序余量也是一个变动量。当工序尺寸用基本尺寸计算时，所得的加工余量称为基本余量或者公称余量。保证该工序加工表面的精度和质量所需切除的最小金属层厚度称为最小余量 Z_{\min} ，该工序余量的最大值则称为最大余量 Z_{\max} 。

工序余量和工序尺寸及公差的关系式如下：

$$Z_{\min} = Z - T_a \quad (1-7)$$

$$Z_{\max} = Z + T_b = Z_{\min} + T_a + T_b \quad (1-8)$$

由此可知：

$$T_z = Z_{\max} - Z_{\min} = T_a + T_b \quad (1-9)$$

即余量公差等于前道工序与本工序的尺寸公差之和。

式中， T_a 为前道工序尺寸的公差； T_b 为本工序尺寸的公差； T_z 为本工序的余量公差。

对于被包容面:

工序余量=上工序基本尺寸-本工序基本尺寸

工序最大余量=上工序最大极限尺寸-本工序最小极限尺寸

工序最小余量=上工序最小极限尺寸-本工序最大极限尺寸

对于包容面:

工序余量=本工序基本尺寸-上工序基本尺寸

工序最大余量=本工序最大极限尺寸-上工序最小极限尺寸

工序最小余量=本工序最小极限尺寸-上工序最大极限尺寸

图 1-19 表示了工序余量与公差的关系。

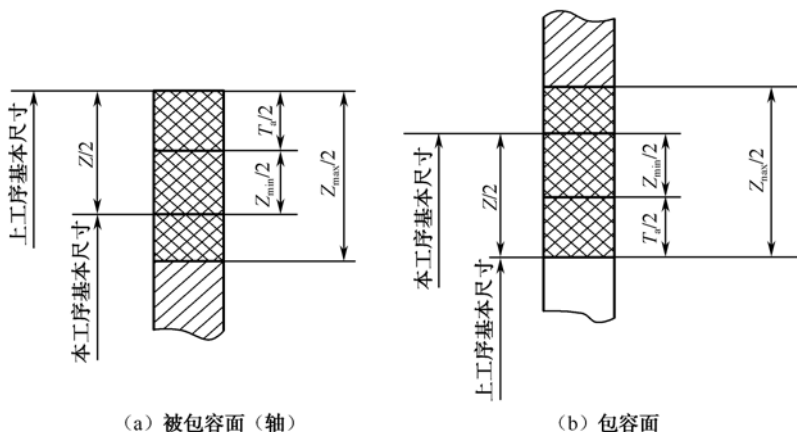


图 1-19 工序余量与公差

为了便于加工, 工序尺寸公差都按“入体原则”标注, 即被包容面的工序尺寸公差取上偏差为零; 包容面的工序尺寸公差取下偏差为零; 而毛坯尺寸公差按双向布置上、下偏差。

2. 影响加工余量的因素

影响加工余量的因素是多方面的, 主要有如下几项。

1) 前道工序的表面粗糙度 R_a 和表面缺陷层厚度 H_a

为了保证加工质量, 本道工序必须将前道工序留下的表面粗糙度和缺陷层切除。前道工序的表面粗糙度和表面缺陷层经加工切除后又形成新的表面粗糙度和表面缺陷层(包括冷硬层、氧化层、裂纹等)。但根据加工过程中逐步减小切削层厚度和切削力的规律, 本工序的表面粗糙度和表面缺陷层厚度必然比前道工序小。在光整加工中, 前道工序的表面粗糙度和表面缺陷层厚度是组成本道工序加工余量的主要因素。表面粗糙度 R_a 和表面缺陷层厚度 H_a 的大小取决于所选用的加工方法, R_a 的数值可参考表 1-11~表 1-13, H_a 的数值可参考表 1-14。

2) 前道工序的尺寸公差 T_a

它包括各种几何形状误差, 如锥度、椭圆度、平面度等。由于工序尺寸有公差, 前道工序的实际工序尺寸有可能出现最大或最小极限尺寸。为了使前道工序的实际工序尺寸在极限尺寸的情况下, 本道工序也能将前道工序留下的表面粗糙度和缺陷层切除, 本道工序的加工余量应包括前道工序的公差。 T_a 的大小可根据选用的加工方法所能达到的经济精度, 查阅《金属机械加工工艺人员手册》确定。

表 1-14 各种加工方法 H_a 的数值

加 工 方 法	H_a (μm)	加 工 方 法	H_a (μm)	加 工 方 法	H_a (μm)
闭式模锻	500	粗扩孔	40~60	粗刨	40~50
冷拉	80~100	精扩孔	30~40	精刨	25~40
热轧	150	粗铰	25~30	粗插	50~60
高精度碾压	300	精铰	10~20	精插	35~50
金属模锻造	100	粗镗	30~50	粗铣	40~60
粗车内外圆	40~60	精镗	25~40	精铣	25~40
精车内外圆	30~40	磨外圆	15~25	拉	10~20
粗车端面	40~60	磨内孔	20~30	切断	60
粗车端面	30~40	磨端面	15~35	研磨	3~5
钻	40~60	磨平面	20~30	抛光	2~5

3) 前道工序的形位误差 ρ_a

它包括轴线的直线度和平行度，轴线与表面的垂直度，阶梯轴或（和）孔的同轴度，平面的平面度等。当工件上某些形状和位置偏差不包括在尺寸公差的范围时，这些误差又必须在本道工序加工纠正，在本道工序的加工余量中必须包括它。 ρ_a 的数值与上道工序的加工方法和零件的结构有关，可用近似计算法或查有关资料确定。若存在两种以上的空间偏差，可用向量和表示。

4) 本道工序的安装误差 ε_b

安装误差包括工件的定位误差和夹紧误差，若用夹具装夹，还应有夹具在机床上的装夹误差。这些误差会使工件在加工时的位置发生偏移，所以加工余量还必须考虑安装误差的影响。形位公差和安装误差具有方向性，因此，本工序的加工余量必须满足如下条件。

双边余量：

$$2Z \geqslant 2(Ra + H_a) + T_a + 2|\rho_a + \varepsilon_b| \tag{1-10}$$

单边余量：

$$Z \geqslant (Ra + H_a) + T_a + |\rho_a + \varepsilon_b| \tag{1-11}$$

还应注意，在理论分析确定某道工序的加工余量时，必须考虑该工序的具体情况。例如，车削装夹在两顶针上的工件外圆或在无心磨床上加工轴时，其装夹误差可忽略不计；用浮动铰刀或用拉刀拉孔时空间偏差对加工余量无影响，且无装夹误差；对于珩磨、研磨、抛光等光整加工工序，其加工目的主要是进一步减小上道工序留下的表面粗糙度，因此其最小加工余量仅与上道工序的表面粗糙度有关。

3. 确定加工余量的方法

确定加工余量的基本原则是：在保证加工质量的前提下，加工余量越小越好。实际工作中，确定加工余量的方法有以下三种。

1) 查表法

根据有关手册提供的加工余量数据，再结合本厂生产实际情况加以修正后确定加工余量。表 1-15 列出了各种常用加工方法的工序加工余量。

表 1-15 各种常用加工方法的工序加工余量

外 圆 加 工	直径加工余量（mm）	内 孔 加 工	直径加工余量（mm）	平 面 加 工	加工余量（mm）
粗车	1.5~4	扩孔	扩后孔径的 1/8	粗刨、粗铣	1~2.5
半精车	0.5~2.5	粗铰	0.15~0.25	精刨、精铣	0.25~0.3
精车	0.2~1.0	精铰	0.05~0.15	粗磨	0.15~0.3
粗磨	0.25~0.6	粗镗	1.8~4.5	精磨	0.05~0.1
精磨	0.1~0.2	半精镗	1.2~1.5	铰削	0.5~2.5
研磨	0.01~0.02	精镗	0.2~0.8	研磨	0.005~0.01
超精加工	0.003~0.02	金刚镗	0.2~0.5	拉削	2~4（精锻、精铸）； 0.3~0.6（预加工）
		拉孔	0.5~1.2		
高精度低粗 糙度磨削	0.02~0.05	粗磨	0.2~0.5	宽刀精刨（超 精刨）	0.05~0.15
		精磨	0.1~0.2		
		研磨	0.01~0.02	刮削	0.1~0.4
		珩孔	0.05~0.14		

2）经验估计法

工艺人员根据本身积累的经验确定加工余量。一般为了防止余量过小而产生废品，所估计的余量总是偏大。这种方法常用于单件、小批量生产。

3）分析计算法

根据理论公式和一定的试验资料，对影响加工余量的各因素进行分析、计算来确定加工余量。这种方法较合理，但需要全面可靠的试验资料，计算也较复杂。

1.3.5 工序尺寸与公差的确

工件上的设计尺寸一般都要经过几道工序的加工才能得到，每道工序所应保证的尺寸称为工序尺寸。编制工艺规程的一个重要工作就是要确定每道工序的工序尺寸及公差。在确定工序尺寸及公差时，存在工序基准与设计基准重合和不重合两种情况。本节仅讨论基准重合时工序尺寸及其公差的计算，不重合时的计算需应用到尺寸链原理，将在 1.4 节讨论。

工序基准与设计基准重合时表面的多次加工，工序尺寸及其公差的计算步骤是：先确定各工序的加工方法，然后确定该加工方法所要求的加工余量及其所能达到的精度，再由最后一道工序逐个向前推算，即由零件图上的设计尺寸开始，一直推算到毛坯图上的尺寸。工序尺寸的公差都按各工序的经济精度确定，并按“入体原则”确定上、下偏差。毛坯公差带可取双向对称分布，也常取 1/3 入体标注，以利于保证粗加工工序余量。

例如，某主轴箱体主轴孔的设计要求为 $\phi 100H7$ ， $Ra=0.8\mu m$ 。其加工工艺路线为：毛坯—粗镗—半精镗—精镗—浮动镗。试确定各工序尺寸及其公差。

从机械工艺手册查得各工序的加工余量和所能达到的精度，具体数值见表 1-16 中的第二、三列，计算结果见表 1-16 中的第四、五列。

表 1-16 主轴孔工序尺寸及公差 的计算

工 序 名 称	工 序 余 量	工序的经济精度	工序基本尺寸	工序尺寸及公差
浮动镗	0.1	$H7\left(\begin{smallmatrix} +0.035 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$	100	$\phi 100^{+0.035}_0$, $Ra=0.8\mu\text{m}$
精镗	0.5	$H9\left(\begin{smallmatrix} +0.087 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$	$100-0.1=99.9$	$\phi 99.9^{+0.087}_0$, $Ra=1.6\mu\text{m}$
半精镗	2.4	$H11\left(\begin{smallmatrix} +0.22 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$	$99.9-0.5=99.4$	$\phi 99.4^{+0.22}_0$, $Ra=6.3\mu\text{m}$
粗镗	5	$H13\left(\begin{smallmatrix} +0.54 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$	$99.4-2.4=97$	$\phi 97^{+0.54}_0$, $Ra=12.5\mu\text{m}$
毛坯孔	8	(± 1.2)	$97-5=92$	$\phi 92\pm 1.2$

1.4 工艺尺寸链

1.3 节已提到，在零件的加工过程中，有时需要多次转换基准而引起工艺基准与设计基准不重合问题，这时的工艺尺寸及其公差需要利用尺寸链原理来计算。另外，在产品 设计、整机装配以及技术测量时，也会遇到尺寸链的分析与计算问题。尺寸链是解决生产实际问题的有力工具，能够为制定最佳工艺规程和装配方法提供理论计算的科学依据，并能为改进加工工艺和装配技术提供有效的技术措施，对保证产品质量和降低成本起着关键性作用。

1.4.1 尺寸链概念*

1. 尺寸链的定义

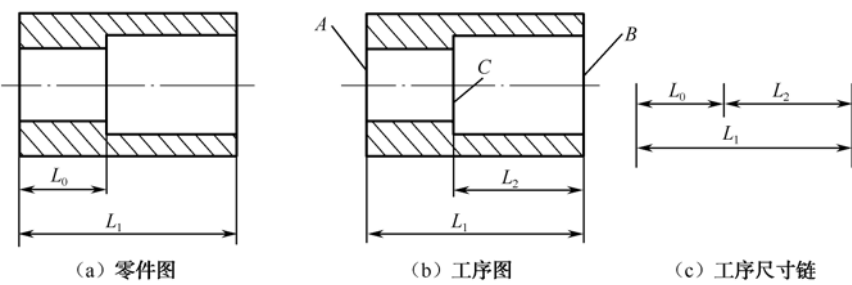


图 1-20 加工过程中的尺寸链

如图 1-20 (a) 所示套筒零件，零件图上沿套筒轴向需保证尺寸 L_0 和 L_1 。而在实际加工中，以 A 面定位车 B 面，保证尺寸 L_1 ；然后以 A 面定位镗通孔、扩孔至 C 面，保证尺寸 L_2 。此时，尺寸 L_0 、 L_1 和 L_2 就形成了一个封闭的图形。

这种相互连接形成封闭的尺寸组就称为尺寸链。加工过程中各有关工艺尺寸所组成的尺寸

* 本章 1.4 节采用的术语及定义采用国家标准《尺寸链 计算方法》(GB/T 5847—2004)

链称为工艺尺寸链。

2. 尺寸链的组成

列入尺寸链的每一个尺寸称为尺寸链的环。这些环可分为封闭环和组成环。

(1) 封闭环：尺寸链中在加工过程或装配过程最后间接形成的一环。每个独立的尺寸链中有且只有一个封闭环。显然，工艺尺寸链的封闭环是由零件的加工顺序来确定的；零件尺寸链的封闭环是图上未标注的尺寸；装配尺寸链的封闭环是装配后间接形成的尺寸，即装配技术要求。封闭环常用下标为“0”的字母表示。

(2) 组成环：尺寸链中对封闭环有影响的全部环。这些环中任意环的变动都必然引起封闭环的变动。组成环通常用下标为“1、2、3，…”的字母表示。组成环又分为增环和减环。

① 增环：尺寸链中的组成环，该环的变动会引起封闭环同向变动。同向变动是指该环增大时封闭环也增大，该环减小时封闭环也减小。

② 减环：尺寸链中的组成环，该环的变动会引起封闭环反向变动。反向变动是指该环增大时封闭环减小，该环减小时封闭环增大。

建立工艺尺寸链时，应首先对工艺过程和工艺尺寸进行分析，确定间接保证精度的尺寸，并将其定为封闭环，然后再从封闭环出发，按照零件表面尺寸间的联系，用首尾相接的单向箭头顺序表示各组成环，这种尺寸图就是尺寸链图。增减环可通过画箭头法（回路法）来确定：从封闭环开始，按任意一个方向作一个回路，与封闭环箭头同向者为减环，与封闭环箭头反向者为增环。

仍以图 1-20 所示的套筒零件加工为例，建立工艺尺寸链如图 1-20 (c) 所示。显然，零件图上的设计尺寸 L_0 是间接获得的，为封闭环； L_1 和 L_2 为组成环，且 L_1 为增环， L_2 为减环。同理，套筒零件的零件尺寸链图也如图 1-20 (c) 所示，但此时 L_2 为封闭环， L_0 为减环， L_1 为增环。

3. 尺寸链的特性

尺寸链的主要特性是封闭性和关联性。

(1) 封闭性：尺寸链是一组有关尺寸首尾相连构成封闭形式的尺寸。

(2) 关联性：尺寸链中间接保证的尺寸的精度是受这些直接获得的尺寸的精度所支配的。

1.4.2 尺寸链的分类

尺寸链的类型根据不同分类方法，可以有各种类型。

(1) 按尺寸链各环的几何特征可分为长度尺寸链与角度尺寸链。

① 长度尺寸链：全部环为长度尺寸的尺寸链，如图 1-20 所示。

② 角度尺寸链：全部环为角度尺寸的尺寸链，如图 1-21 所示。

(2) 按尺寸链的应用范围可分为装配尺寸链、零件尺寸链与工艺尺寸链。

① 装配尺寸链：全部组成环为不同零件设计尺寸所形成的尺寸链。

② 零件尺寸链：全部组成环为同一零件设计尺寸所形成的尺寸链。

③ 工艺尺寸链：全部组成环为同一零件工艺尺寸所形成的尺寸链。

设计尺寸指零件图上标注的尺寸；工艺尺寸指工序尺寸、定位尺寸与测量尺寸等。装配尺寸链与零件尺寸链统称为设计尺寸链。

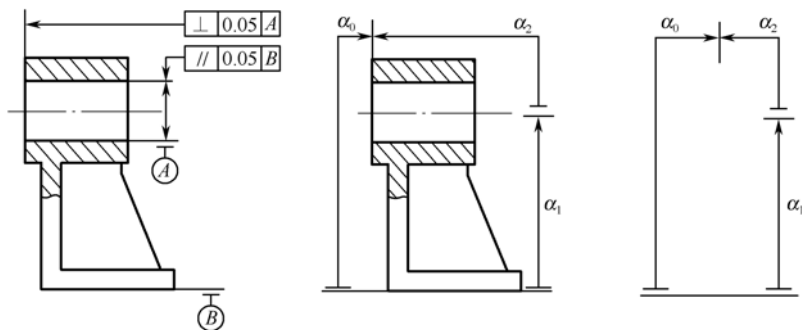


图 1-21 角度尺寸链

(3) 按尺寸链之间相互关系可分为基本尺寸链与派生尺寸链。

① 基本尺寸链：全部组成环皆直接影响封闭环的尺寸链。

② 派生尺寸链：一个尺寸链的封闭环为另一个尺寸链组成环的尺寸链。

(4) 按尺寸链各环的物理力学性质可分为标量尺寸链与矢量尺寸链。

① 标量尺寸链：全部组成环为标量尺寸所形成的尺寸链。

② 矢量尺寸链：全部组成环为矢量尺寸所形成的尺寸链。

(5) 按尺寸链在空间分布的位置关系可分为直线尺寸链、平面尺寸链和空间尺寸链。

① 直线尺寸链：全部组成环平行于封闭环的尺寸链，如图 1-20 (c) 所示。

② 平面尺寸链：全部组成环位于一个或几个平行平面内，但某些组成环不平行于封闭环的尺寸链，如图 1-22 所示。

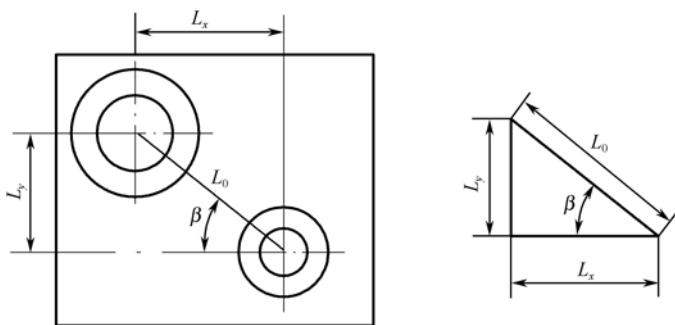


图 1-22 平面尺寸链

③ 空间尺寸链：组成环位于几个不平行平面内的尺寸链。

尺寸链的分类虽然有多种，但基本的、典型常用的是直线尺寸链。其他类型的尺寸链均可通过适当的变换，转换成直线尺寸链的问题进行分析。本书主要讨论直线尺寸链的计算。

1.4.3 直线尺寸链的计算

尺寸链的计算形式分为正计算、反计算和中间计算三种。

(1) 正计算：已知组成环 L_i ，求封闭环 L_0 。用于验算、校核，结果唯一。

(2) 反计算：已知封闭环 L_0 ，求组成环 L_i 。用于设计计算，将封闭环公差合理地分配给各组成环，确定最佳方案，结果不唯一。

(3) 中间计算: 已知封闭环 L_0 和部分组成环, 求其余组成环。它用于设计、工艺尺寸计算、校核等场合。

尺寸链的计算方法分极值法和概率法两种, 在工艺尺寸链的计算中多用极值法计算, 因此本节不详细介绍概率法。

1. 极值法

极值法是按误差综合最不利的情况, 即各增环均为最大(或最小)极限尺寸而减环均为最小(或最大)极限尺寸来计算封闭环极限尺寸的。此法的优点是简便、可靠, 可以保证完全互换, 其缺点是当封闭环公差较小、组成环数目较多时, 会使组成环的公差过于严格, 因此通常应用在环数少、精度低的场合。

1) 封闭环的基本尺寸

封闭环的基本尺寸等于组成环尺寸的代数和, 即

$$L_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i L_i = \sum_{p=1}^k |\xi_p| L_p - \sum_{q=k+1}^m |\xi_q| L_q \quad (1-12)$$

式中, L_0 为封闭环的基本尺寸; L_i 为组成环的基本尺寸; L_p 为增环的基本尺寸; L_q 为减环的基本尺寸; k 为增环数; m 为组成环数; ξ 为尺寸传递系数, 表示各组成环对封闭环影响大小的系数, 增环为正值, 减环为负值。如图 1-21 所示, 图中尺寸链由组成环 L_x 、 L_y 和封闭环 L_0 组成, 由图可知, 组成环 L_x 、 L_y 与封闭环 L_0 之间的函数式为

$$L_0 = L_x \times \cos\beta + L_y \times \sin\beta$$

即

$$\xi_x = \cos\beta, \quad \xi_y = \sin\beta$$

对于直线尺寸链, $|\xi_p| = |\xi_q| = 1$, 因此有

$$L_0 = \sum_{p=1}^k L_p - \sum_{q=k+1}^m L_q \quad (1-13)$$

2) 封闭环的上偏差 $ES(L_0)$ 和下偏差 $EI(L_0)$

对于直线尺寸链, 封闭环的上偏差等于所有增环的上偏差之和减去所有减环的下偏差之和; 封闭环的下偏差等于所有增环的下偏差之和减去所有减环的上偏差之和, 即

$$ES(L_0) = \sum_{p=1}^k ES(L_p) - \sum_{q=k+1}^m EI(L_q) \quad (1-14)$$

$$EI(L_0) = \sum_{p=1}^k EI(L_p) - \sum_{q=k+1}^m ES(L_q) \quad (1-15)$$

3) 封闭环的极限尺寸

对于直线尺寸链, 封闭环的最大极限尺寸等于所有增环的最大极限尺寸之和减去所有减环的最小极限尺寸之和; 封闭环的最小极限尺寸等于所有增环的最小极限尺寸之和减去所有减环的最大极限尺寸之和。即

$$L_{0\max} = \sum_{p=1}^k L_{p\max} - \sum_{q=k+1}^m L_{q\min} = L_0 + \text{ES}(L_0)$$
$$L_{0\min} = \sum_{p=1}^k L_{p\min} - \sum_{q=k+1}^m L_{q\max} = L_0 - \text{EI}(L_0) \tag{1-16}$$

4) 封闭环的公差 T_0

对于直线尺寸链，封闭环的公差等于所有组成环公差之和，即

$$T_0 = \text{ES}(L_0) - \text{EI}(L_0) = \sum_{i=1}^m |\xi_i| T_i = \sum_{i=1}^m T_i \tag{1-17}$$

式中， T_i 为组成环的公差。

式（1-17）进一步说明了尺寸链的关联性。组成环越多，封闭环的公差越大，越难保证封闭环的制造精度。

5) 封闭环的平均尺寸 $L_{0\text{av}}$ 与平均偏差 Δ_0

根据平均尺寸的含义，一个尺寸的平均尺寸为其最大、最小尺寸之和的一半。由此可知，对于直线尺寸链，封闭环的平均尺寸 $L_{0\text{av}}$ 为

$$L_{0\text{av}} = \frac{L_{0\max} + L_{0\min}}{2} = \sum_{p=1}^k L_{p\text{av}} - \sum_{q=k+1}^m L_{q\text{av}} \tag{1-18}$$

式中，各组成环的平均尺寸 $L_{i\text{av}}$ 为

$$L_{i\text{av}} = \frac{L_{i\max} + L_{i\min}}{2}$$

因此，对于直线尺寸链，封闭环平均尺寸等于所有增环平均尺寸之和减去所有减环平均尺寸之和。

封闭环的平均偏差 Δ_0 是指实际偏差的平均值，有

$$\Delta_0 = L_{0\text{av}} - L_0 = \frac{\text{ES}(L_0) + \text{EI}(L_0)}{2} = \sum_{p=1}^k \Delta_{p\text{av}} - \sum_{q=k+1}^m \Delta_{q\text{av}} \tag{1-19}$$

封闭环还可列竖式进行解算，见表 1-17。

列竖式解算直线尺寸链时的应用口诀为：增环，上下偏差照抄；减环，上下偏差对调、反号。

竖式法求解尺寸链主要用于验算封闭环。

表 1-17 竖式法求解尺寸链

环 的 类 型	基 本 尺 寸	上偏差 ES	下偏差 EI
增环 L_1	$+L_1$	$\text{ES}(L_1)$	$\text{EI}(L_1)$
L_2	$+L_2$	$\text{ES}(L_2)$	$\text{EI}(L_2)$
减环 L_3	$-L_3$	$-\text{EI}(L_3)$	$-\text{ES}(L_3)$
L_4	$-L_4$	$-\text{EI}(L_4)$	$-\text{ES}(L_4)$
封闭环 L_0	L_0	$\text{ES}(L_0)$	$\text{EI}(L_0)$

下面通过实例来说明各公式的运用。

如图 1-20(a)所示套筒零件,其加工工序图如图 1-20(b)所示。已知: $L_0 = 20_{-0.2}^0$, $L_1 = 50_{+0.1}^0$, 需要确定加工工序尺寸 L_2 及其偏差。

根据加工工序过程,可列相关加工工序尺寸链如图 1-20 (c) 所示。在该尺寸链中,封闭环为 L_0 , 增环为 L_1 , 减环为 L_2 , 有:

- (1) $L_0=L_1-L_2$, 即 $L_2=L_1-L_0=50-20=30\text{mm}$;
- (2) $ES(L_0)=ES(L_1)-EI(L_2)$, 即 $EI(L_2)=ES(L_1)-ES(L_0)=0.1-0=0.1$
- (3) $EI(L_0)=EI(L_1)-ES(L_2)$, 即 $ES(L_2)=EI(L_1)-EI(L_0)=0-(-0.2)=0.2$

因此, 加工工序尺寸 $L_2 = 30_{+0.1}^{+0.2}$ 。
也可通过竖式法来求解此工艺尺寸链, 见表 1-18。

表 1-18 竖式法求解工序尺寸

环 的 类 型	基 本 尺 寸	上 偏 差 ES	下 偏 差 EI
增 环 L_1	50	+0.1	0
减 环 (L_2)	(-30)	(-0.1)	(-0.2)
封 闭 环 L_0	20	0	-0.2

2. 概率法

在正常情况下, 尺寸链中每一组成环获得极限尺寸的可能性很小, 而所有组成环同时为极限尺寸的可能性更小。当封闭环精度要求高而组成环环数较多以及大批大量生产中, 通常采用概率法来进行计算。概率法是应用概率论与数理统计原理来进行尺寸链分析计算的, 也称为统计法。

根据概率统计原理, 可以认为加工一批工件的尺寸总是有一定的统计规律, 而尺寸偏差又是随机变量, 如果各环之间是彼此独立的随机变量, 那么可按概率原理进行分析计算。

在一批被加工零件中, 误差的大小在一定范围内分散, 其分布服从随机变量的分布规律。根据概率论的有关定理可以认为: 如果随机变量为多个相互独立的随机变量之和, 且其中不存在对总体影响特别显著的独立变量, 则不论这些独立变量服从何种分布, 其总体总是近似地服从正态分布, 而且独立随机变量的个数越多越精确。

封闭环误差也就是这一类的随机变量, 即其为各组成环随机误差之和。因此, 封闭环将服从正态分布, 而且尺寸链组成环越多越精确。实际上, 当尺寸链组成环环数 $n \geq 5$ 时, 封闭环的分布已十分接近正态分布。

在计算封闭环误差时, 要考虑各组成环的分布情况, 需要有一个相对分布系数 k_i 。相对分布系数 k_i 表示第 i 个组成环误差的分布与封闭环通常服从的正态分布差别的程度, 其大小等于第 i 个组成环误差的相对均方差与服从正态分布的误差的相对均方差之比。典型分布曲线的 k 的取值见表 1-19。

对于直线尺寸链, 当组成环为各种尺寸分布, 但封闭环服从正态分布时, 根据概率统计的有关定理可确定封闭环的公差 T_{0s} (称为统计公差) 与各组成环公差 T_i 之间的关系式为

$$T_{0s} = \frac{1}{k_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2 T_i^2}$$

(1-20)

表 1-19 典型分布曲线的 e 值和 k 值

分 布 特 征	正 态 分 布	三 角 分 布	均 匀 分 布	偏 态 分 布	
				外 尺 寸	内 尺 寸
分布曲线					
e	0	0	0	0.26	-0.26
k	1	1.22	1.73	1.17	1.17
Δ*(分布范围)	6σ	4.92σ	3.47σ	5.13σ	5.13σ

在确定了有关组成环的公差大小以后，还需要确定其公差带的分布位置。尺寸分布的集中位置是用算术平均值来 L_M 表示的。

由概率论原理可知，直线尺寸链封闭环的算术平均值 L_{0M} 等于各增环算术平均值 L_{pM} 之和减去各减环算术平均值 L_{qM} 之和，即

$$L_{0M} = \sum_{p=1}^k L_{pM} - \sum_{q=k+1}^m L_{qM}$$

(1-21)

当各组成环尺寸分布曲线属于对称分布时，其算术平均值即为其基本尺寸，那么式 (1-21) 也可表示为

$$L_{0M} = \sum_{p=1}^k L_p - \sum_{q=k+1}^m L_q$$

这和极值法解算时的计算公式完全一致。

当组成环的尺寸分布属于不对称分布时，算术平均值 L_{iM} 相对于公差中心(即平均尺寸 L_{iav}) 的尺寸将产生一差距 (即中间偏差) $\Delta_i = L_{iM} - L_{iav}$ ，如图 1-23 所示， Δ_i 可表示为

$$\Delta_i = L_{iM} - L_{iav} = e_i \frac{T_i}{2}$$

(1-22)

式中， e_i 为第 i 环的相对不对称系数，表征分布曲线不对称程度的系数；在公差带内对称分布时， $e_i = 0$ ，也就是有 $\Delta_i = 0$ ； e 的取值见表 1-19。

由此可得算术平均值 L_{iM} 与平均尺寸 L_{iav} 、 e_i 和 T_i 之间的关系为

$$L_{iM} = L_{iav} + e_i \frac{T_i}{2}$$

(1-23)

将式 (1-23) 代入式 (1-21)，并考虑到封闭环为正态分布时 $e_0 = 0$ ，就得到概率解的另一基本公式：

*关于分布范围的应用，将在 4.4 节讨论。

$$L_{0M} = \sum_{p=1}^k (L_{pav} + e_p \frac{T_p}{2}) - \sum_{q=k+1}^m (L_{qav} + e_q \frac{T_q}{2}) \quad (1-24)$$

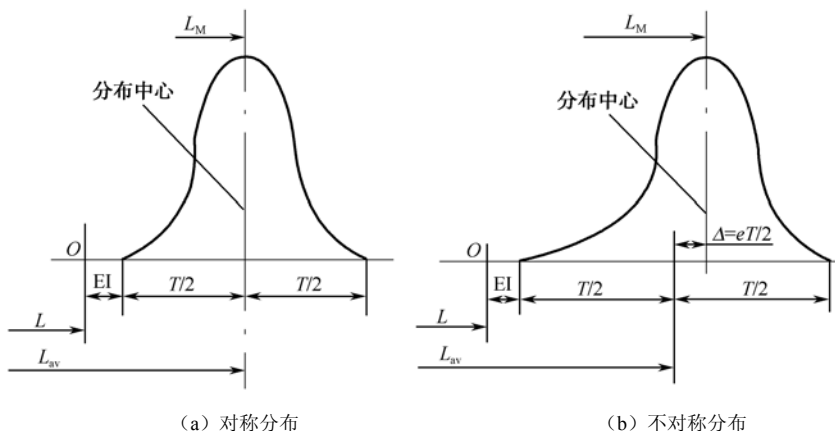


图 1-23 分布曲线的尺寸计算

用概率法解尺寸链，考虑了零件尺寸分布特性，因此更科学、更合理。在正计算中可以得到较小的封闭环公差，满足较高的使用要求；在反计算中，可以扩大组成环的制造公差，有利于零件加工的经济性。但用概率法计算较为复杂，使得其在应用上受到一定的限制。

在生产实际中，由于获得 k 和 e 值有一定的难度，所以一般取一个共同的相对分布系数平均值 k_M 来进行估算。于是得到概率法的近似公差计算公式为

$$T_{0E} = k_M \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m T_i^2} \quad (1-25)$$

式中， T_{0E} 为当量公差； k_M 为常取 1.2~1.6。

在解算尺寸链时，有两类情况需要注意：

(1) 在求某一组成环的公差时得到零值或负值（或上偏差小于下偏差）的结果，即其余组成环的公差之和等于或大于封闭环的公差。此时必须根据工艺可能性重新决定其余组成环的公差，即紧缩它们的制造公差，提高其加工精度。

(2) 在反计算时，即在设计工作中，通常是给定的封闭环的公差来确定各组成环的公差。

① 按等公差值的原则分配封闭环的公差，即组成环的公差为

$$T_{avL} = \frac{T_0}{\sum_{i=1}^m |\xi_i|} \quad (\text{极值法}) \quad (1-26)$$

或

$$T_{avS} = \frac{k_0 T_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \xi_i^2 k_i^2}} \quad (\text{概率法}) \quad (1-27)$$

这种方法计算简单，但从工艺上来说是不够合理的，可以有选择地使用。

② 按等公差级的原则分配封闭环的公差，即各组成环的公差根据其基本尺寸的大小按比例分配，或按照公差表中的尺寸分段及某一公差等级，规定组成环的公差，使得各组成环的公差符合如下条件：

$$T_0 \geq \sum_{i=1}^m T_i \quad (1-28)$$

最后加以适当调整。这种方法从工艺上来讲是比较合理的，但只考虑组成环的尺寸大小，没有考虑各环加工的难易程度。

③ 组成环的公差按实际情况来分配。这与设计经验有关，但实质上仍是从工艺的观点来考虑，因此比较经济合理。

在制订工艺过程中，利用工艺尺寸链解算或验算工艺尺寸的主要工作有以下几项。

1) 定位基准与设计基准不重合时的工艺尺寸及其公差的确定

采用调整法加工零件时，若所选的定位基准与设计基准不重合，那么该加工表面的设计尺寸就不能由加工直接得到，这时就需要进行工艺尺寸的换算，以保证设计尺寸的精度要求，并将计算的工序尺寸标注在工序图上。

如图 1-24 (a) 所示工件，如先以 A 面定位加工 C 面，得尺寸 A_1 ；然后再以 A 面定位用调整法加工台阶面 B ，得尺寸 A_2 ，要求保证 B 面与 C 面间尺寸 A_0 ，需要确定工序尺寸 A_2 。

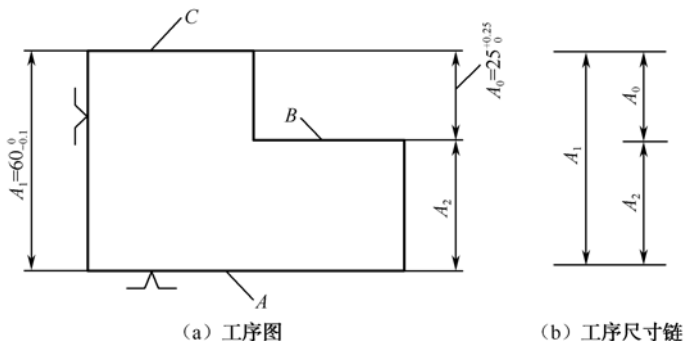


图 1-24 调整法加工台阶面

首先建立尺寸链：根据加工工序，建立如图 1-24 (b) 所示加工工序尺寸链。

再判断封闭环及增、减环：显然， B 面与 C 面间尺寸 A_0 是通过间接保证的，为封闭环；增、减环通过回路法确定， A_1 为增环， A_2 为减环。 $A_0 = 25_{-0.25}^{+0.25}$ ， $A_1 = 60_{-0.1}^0$ 。

那么，由式 (1-13)、式 (1-14) 和式 (1-15) 可得下列关系式：

- (1) $A_0 = A_1 - A_2$ ，即 $A_2 = 60 - 25 = 35$ ；
- (2) $ES(A_0) = ES(A_1) - EI(A_2)$ ，即 $EI(A_2) = 0 - (+0.25) = -0.25$ ；
- (3) $EI(A_0) = EI(A_1) - ES(A_2)$ ，即 $ES(A_2) = -0.1 - 0 = -0.1$ 。

因此，工序尺寸 $A_2 = 35_{-0.25}^{-0.1}$ 。

2) 工序基准为待继续加工的设计基准时的中间工序尺寸计算

从待加工的设计基准（一般为基面）标注工序尺寸，因为待加工的设计基准与设计基准两者差一个加工余量，所以这仍然可以作为设计基准与定位基准不重合的问题进行解算。

如图 1-25 (a) 所示偏心零件, 其表面 A 要求渗碳处理, 渗碳层深度规定为 $0.5 \sim 0.8 \text{ mm}$, 零件上与此有关的加工过程如下: 精车 A 面, 保证尺寸为 $\phi 26.2_{-0.1}^0 \text{ mm}$; 渗碳处理, 控制渗碳层深度为 H_1 ; 精磨 A 面, 保证尺寸 $\phi 25.8_{-0.016}^0 \text{ mm}$; 同时保证渗碳层深度达到规定的要求。需要确定渗碳层深度 H_1 的数值。

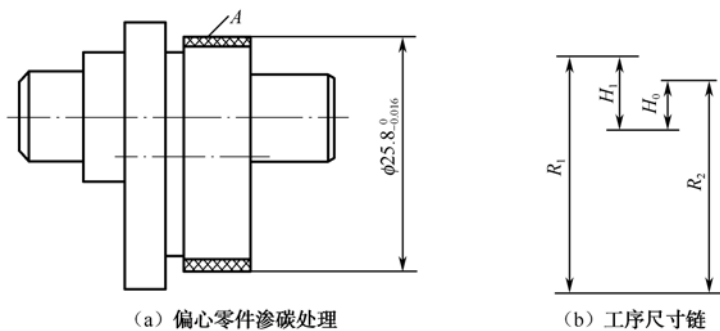


图 1-25 渗碳处理工艺尺寸

根据工艺工程, 可以建立与加工过程有关的尺寸链如图 1-25 (b) 所示。在尺寸链中, 封闭环为零件上的渗碳层深度 $H_0 = 0.5_{-0}^{+0.3} \text{ mm}$, 从而可确定: 减环为 $R_1 = 13.1_{-0.05}^0$; 增环为 H_1 和 $R_2 = 12.9_{-0.008}^0$ 。

根据尺寸链计算公式, 有:

$$H_0 = H_1 + R_2 - R_1 \quad \text{即} \quad 0.5 = H_1 + 12.9 - 13.1, \quad \text{从而} \quad H_1 = 0.7;$$

$$ES(H_0) = ES(H_1) + ES(R_2) - EI(R_1) \quad \text{即} \quad 0.3 = ES(H_1) + 0 - (-0.05), \quad \text{从而} \quad ES(H_1) = 0.25;$$

$$EI(H_0) = EI(H_1) + EI(R_2) - ES(R_1) \quad \text{即} \quad 0 = EI(H_1) + (-0.008) - 0, \quad \text{从而} \quad EI(H_1) = 0.008.$$

因此, 在渗碳处理时, 应控制渗碳层深度 $H_1 = 0.7_{0.008}^{0.25} \text{ mm}$ 。

3) 测量基准与设计基准不重合时的工艺尺寸及其公差确定

在工件加工过程中, 有时会遇到一些表面加工之后, 按设计尺寸不便直接测量的情况, 因此需要在零件上另选一容易测量的表面作为测量基准进行测量, 以间接保证设计尺寸的要求。这时就需要进行工艺尺寸的换算。

如图 1-26 (a) 所示主轴箱, 两孔 III、IV 中心距 $127 \pm 0.07 \text{ mm}$ 不便测量, 只能用游标卡尺直接测量两孔内侧或外侧母线之间的距离来间接保证中心距之间的尺寸要求。现采用测量两孔内侧母线的方法, 求该测量尺寸应为多少, 才能满足孔心距的要求。

简要求解过程如下:

(1) 建立尺寸链, 如图 1-26 (b) 所示, 两孔内侧母线定义为 L_2 。

(2) 判断增环和减环。由于 $L_1 = 32.554.5_{-0}^{+0.015}$ 、 $L_2 = L_3 = 40_{-0.009}^{+0.002}$ 为直接测量值, 所以是尺寸链的组成环。而 $L_0 = 127 \pm 0.07$ 是间接得到的, 为尺寸链的封闭环, 且由回路法可知 L_1 、 L_2 、 L_3 为增环。

(3) 由式 (5-13)、式 (5-14) 和式 (5-15) 可得:

$$127 = 40 + L_2 + 32.5$$

$$0.07 = 0.002 + ES(L_2) + 0.015$$

$$-0.07 = -0.009 + EI(L_2) + 0$$

因此, $L_2 = 54.5_{-0.061}^{+0.053} \text{ mm}$ 。

只要实测结果在 L_2 的公差范围内, 就一定能保证 III、IV 中心线的设计要求。

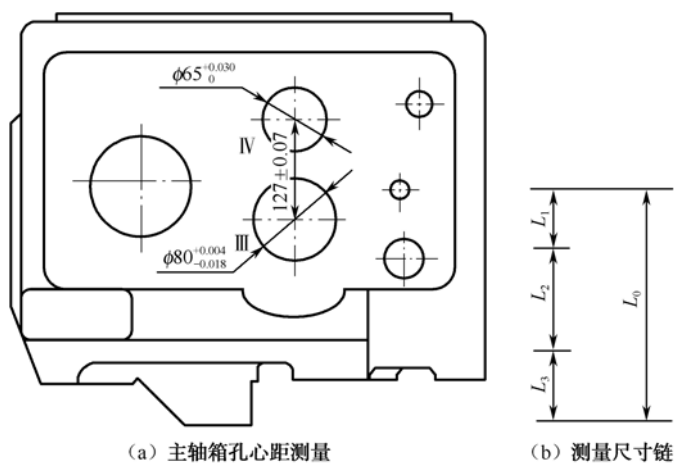


图 1-26 主轴箱Ⅲ、Ⅳ轴孔中心距测量

需要指出的是，直线尺寸链极值算法是极限情况下的各尺寸之间的尺寸联系。从保证封闭环的尺寸要求看，是保守算法，虽然计算结果可靠，但可能出现假废品。

上例中若两孔的直径尺寸都取上限，即 $L_1=40.002$ ， $L_3=32.515$ ， $L_2=54.5-0.087$ 时，则 $L_1+L_2+L_3=126.93$ 为中心距设计尺寸的下限尺寸。但显然测量值 L_2 已超出采用极值法所求的计算值，造成了所谓的“假废品”。

产生假废品的根本原因在于测量基准和设计基准不重合。组成环数越多，公差范围越大，出现假废品的可能性越大。为避免假废品的产生，发现实测尺寸超差时，需对零件进行复查，加大了检验工作量。为了减少假废品出现的可能性，有时可采用专用量具检测。

4) 靠火花磨削的工序尺寸计算

靠火花磨削，是由工人凭经验根据砂轮磨工件时产生火花大小来判断磨去余量多少，磨削时不再测量工件尺寸，从而间接保证加工尺寸的一种磨削方法。

此时由上、下两道工序构成的工艺尺寸链中，余量不再是间接尺寸，也不再是封闭环。而本道工序尺寸是间接保证的，所以是封闭环。

如图 1-27 所示，加工顺序如下。

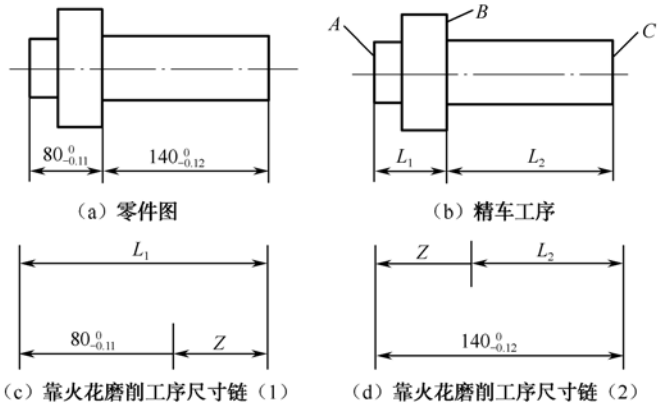


图 1-27 靠火花磨削工序尺寸链

工序Ⅰ：以 A 面定位，精车表面 B 、 C ，得尺寸 L_1 、 L_2 。

工序Ⅱ：以 A 面定位靠火花磨削 B 面保证尺寸为 $80_{-0.11}^0$ 和 $140_{-0.12}^0$ 。

试确定精车尺寸 L_1 、 L_2 。

如前所述，在靠火花磨削加工中，最终加工尺寸 $80_{-0.11}^0$ 和 $140_{-0.12}^0$ 为封闭环，而靠火花余量 Z 是直接保证的，为组成环。因此，可建立尺寸链如图 1-27（c）、（d）所示。在尺寸链图 1-27（c）中， Z 为减环；而在尺寸链图 1-27（d）中， Z 为增环。

查相关手册确定靠火花余量 $Z=0.1\pm0.02$ 。

用竖式解尺寸链，见表 1-20。

表 1-20 竖式法求解靠火花工序

环 的 类 型	基 本 尺 寸	上偏差 ES	下偏差 EI
增环（ L_1 ）	（80.1）	（-0.02）	（-0.09）
减环 Z	-0.1	+0.02	-0.02
封闭环	80	0	-0.11
增环（ L_2 ）	（139.9）	（-0.02）	（-0.10）
Z	0.1	+0.02	-0.02
封闭环	140	0	-0.12

即 $L_1 = 80.1_{-0.09}^{-0.02} = 80.08_{-0.07}^0 \text{ mm}$ ， $L_2 = 139.9_{-0.10}^{-0.02} = 139.88_{-0.08}^0 \text{ mm}$ 。

尺寸链原理可以用来揭示机械产品中结构设计、机械制造过程中的尺寸联系和尺寸形成过程中的相互影响的一些客观规律，因此可以作为产品设计、零件加工、检验和装配中的尺寸分析和尺寸计算的一种很有效的方法。

随着尺寸链原理在生产应用中的发展，目前对工序尺寸及公差的解算，已有利用计算机辅助计算的研究成果和应用实例。

习题 1

- 1-1. 简述下列基本概念：生产过程，工艺过程，机械加工工艺过程，工艺规程，工序，工步，走刀，工位，生产纲领，生产类型，基准，经济精度，加工余量，工序余量，尺寸链。
- 1-2. 工艺规程在生产中起哪些作用？
- 1-3. 简述机械加工工艺规程的设计原则、步骤和内容。
- 1-4. 某机床厂年产机床 1000 台，已知机床主轴的备品率为 10%，机械加工废品率为 5%。试计算主轴的年生产纲领，并说明属于何种生产类型，工艺过程有何特点？若一年工作日为 280 天，试计算每月(按 22 天计算)的生产批量。
- 1-5. 选择加工方法应考虑的主要问题有哪些？
- 1-6. 如何选择粗基准与精基准？
- 1-7. 简述机械加工工序顺序的安排原则。
- 1-8. 分析影响工序余量的主要因素。

1-9. 如何确定尺寸链的各组成环？

1-10. 试写出如图 1-28 所示小轴的机械加工工艺规程，并分析每种方案的工艺过程组成。

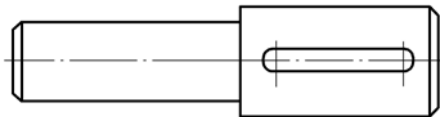


图 1-28 小轴的机械加工

1-11. 试给出成批生产如图 1-29 所示轴盖机械加工工艺过程，并指出各工序的定位基准。

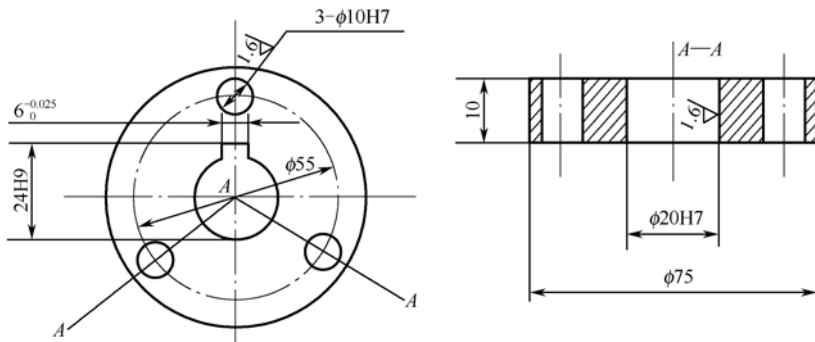


图 1-29 轴盖零件图

1-12. 如图 1-30 所示零件，其主要加工工艺过程如下：（1）精车外圆至 $\phi 25.3_{-0.084}^0$ ；（2）铣键槽；（3）渗碳淬火 HRC56~62；（4）磨外圆至 $\phi 25_{-0.014}^0$ 。

加工完毕要求保证键槽深度 $4_{-0.014}^0$ 。设精车外圆与磨外圆同轴度误差为零。试求：铣键槽时用深度尺以上母线为测量基准的测量尺寸 A 。

1-13. 如图 1-31 所示零件，在车床上已加工好外圆、内圆及各面，现在需铣出右端槽，并保证尺寸 26 ± 0.2 ，求试切调刀的度量尺寸 A 。

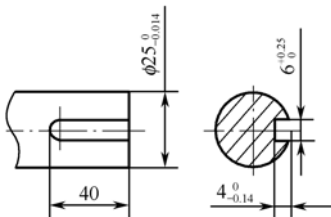


图 1-30 铣键槽零件图

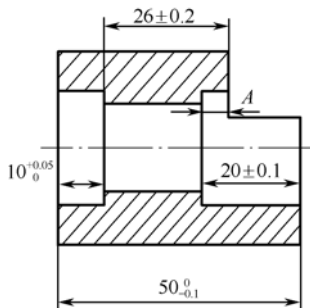


图 1-31 铣右端槽零件图

1-14. 加工如图 1-32 所示零件的轴向尺寸，加工过程如下：（1）精车 A 面（车平）；（2）精车 B 面，保证 A 、 B 面距离尺寸 A_1 ；（3）自 D 处切断，保证 B 、 D 面距离尺寸 A_2 ；（4）掉头装夹，精车 C 面，保证 B 、 C 面距离尺寸 $A_3=24 \pm 0.05\text{mm}$ ；（5）精车 D 面，保证 C 、 D 面距离尺寸 $A_4=20_{-0.1}^0\text{mm}$ 。

若已知切断时经济加工公差为 0.5mm，精车时最小余量为 0.2mm。试用尺寸链极值法确定各工序尺寸及偏差。

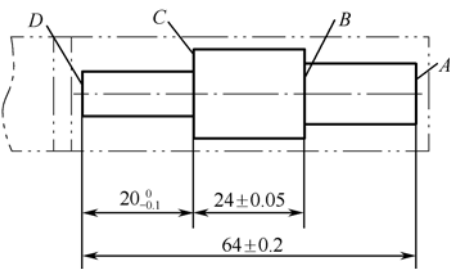


图 1-32 轴向尺寸加工

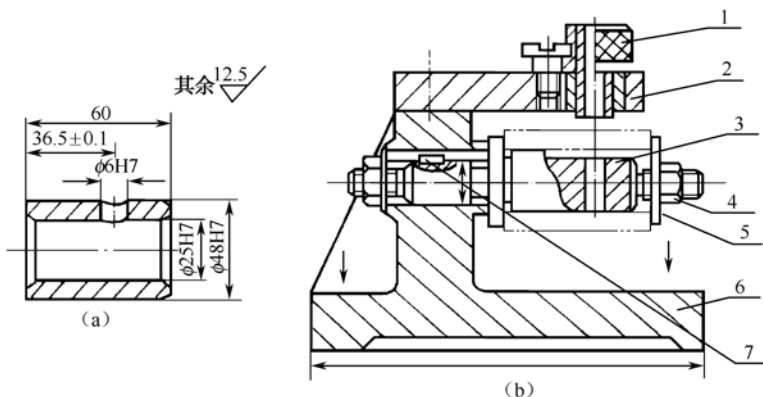
第2章

机床夹具设计基础

2.1 概述

机床夹具是用来安装工件的机床附加装置，是在切削加工中，用于准确快捷地确定工件和刀具以及机床之间的相对加工位置，并把工件可靠夹紧的工艺装备。只有正确地将工件装夹在机床夹具上，才能便利有效地加工出符合图纸设计要求的合格零件。因此，设计制造出合理的夹具对保证加工质量、提高劳动生产率具有十分重要的意义。

2.1.1 夹具的作用



1—快换钻套；2—钻模板；3—定位销；4—螺母；5—开口垫圈；6—夹具体；7—键

图 2-1 钻床夹具

图 2-1 (b) 所示为钻铰如图 2-1 (a) 所示套筒零件上 $\phi 6H7$ 孔的钻床夹具。工件以内孔和端面在定位销 3 上定位, 插入开口垫圈 5, 旋紧螺母 4 把工件夹紧, 钻模板 2 的快换钻套 1 用来导引刀具(钻头、铰刀)对工件进行钻孔和铰孔, 所有元件都装在夹具体 6 上。

由上例可看出夹具的主要作用如下:

(1) 保证工件加工精度, 稳定产品质量。图 2-1 中, 工件在夹具中的正确位置是通过工件上的定位表面(内孔和端面)与夹具上的定位元件的定位表面(定位销外圆和端面)相接触(配合)来保证的, 不需找正便可夹紧工件, 工件上孔 $\phi 6H7$ 的位置精度由钻模保证, 只要机床与刀具调整好, 工件的加工精度可稳定保证。

(2) 提高生产效率, 降低生产成本。采用夹具, 工件无须画线找正, 安装方便迅速, 可以采用多件装夹、机动夹紧, 可以加快夹紧速度, 缩短辅助时间, 还可以加大切削用量、缩短机动时间, 从而提高劳动生产率, 降低加工成本。

(3) 扩大机床工艺范围, 改变机床的用途。在当前多品种小批量生产的条件下, 设计制造专用夹具, 使机床“一机多能”, 能解决机床的数量、品种和工件的种类、规格不相符合的矛盾。例如, 在车床托板上设计并装上镗模, 就可以进行箱体镗孔, 代替镗床的部分工作。又如, 利用分度头可以在万能铣床上加工齿轮和花键, 代替齿轮加工机床进行加工。

(4) 减轻工人劳动强度, 保证安全生产。夹具一般采用杠杆、螺旋、凸轮、气动、液动和电气等机构, 装卸方便、省力, 夹紧安全可靠, 降低了对工人的技术要求, 并减轻了工人的劳动强度。

在不同的生产规模和生产条件下, 夹具的作用和结构有很大的差异。例如, 在单件小批量生产条件下, 宜使用通用可调夹具, 或者为了扩大机床的工艺范围和改变机床的用途, 采用专用夹具, 其结构应力求简单。在大批量生产条件下, 夹具的主要作用是在保证加工精度的前提下提高生产率, 因此夹具的结构应完善, 自动化程度可以相对提高, 虽然夹具的制造费用大一些, 由于生产率的提高、产品质量的稳定, 技术经济效果还是较好的。

2.1.2 夹具的分类

在制造工厂中, 从原料入厂到最后产品出厂为止的各个部门中, 都广泛使用着各种各样的夹具, 如在热处理、焊接、机械加工、表面涂覆、检验、装配等各工序中, 都使用着既适合于本工序要求, 又方便快捷的夹具。夹具大致可分为机床夹具、检测夹具、装配夹具、焊接夹具等几大类。本章主要研究机床夹具。

1. 按夹具的使用特点分类

1) 通用夹具

通用夹具一般作为通用机床的附件提供, 是指已经标准化的、在加工不同的工件时无须调整或稍加调整(不必特殊调整)就可以使用的夹具, 如车床上的三爪卡盘、四爪卡盘、顶尖等, 铣床上的平口虎钳、分度头、回转工作台等。通用夹具一般由专业厂家制造, 具有通用性强、加工精度不很高、生产效率低等特点, 适用于单件、小批量生产。

2) 专用夹具

专用夹具是指根据某一工件的某一工序的加工要求而专门设计的夹具。专用夹具可以按照工件的加工要求设计得结构紧凑, 操作迅速、方便、省力, 以提高生产效率。但专用夹具设计

制造周期长、成本较高，当产品变更时无法继续使用，所以适用于产品固定的大批量生产。

3) 可调夹具

可调夹具是指在加工形状相似、尺寸相近的多种工件时，只需更换或调整夹具上的个别元件或部件，就可以使用的夹具。可调夹具分为通用可调夹具和成组可调夹具，其中通用可调夹具的适用范围广一些，但加工对象不明确，其可更换或可调整部分的设计应有较大的适应性，而成组可调夹具是专门为成组工艺中的某一组（族）零件加工而设计的，加工对象和使用范围都很明确。

采用可调夹具可以显著减少专用夹具数量，缩短生产周期，降低生产成本，因此在多品种、小批量生产中得到广泛应用。

4) 随行夹具

随行夹具是自动线夹具的一种。自动线夹具基本上可分为两类：一类是固定式夹具，它与一般专用夹具相似；另一类是随行夹具，该夹具既要起到装夹工件的作用，又要与工件成为一体沿着自动线从一个工位移到下一个工位，进行不同工序的加工。

5) 组合夹具

组合夹具是由一套事先制造好的标准元件和部件组装而成的夹具。元、部件之间相互配合部分的尺寸精度高、硬度高、耐磨性好，且具有完全互换性，故可以随时拆卸和组装，特别适用于新产品的试制和单件小批量生产。

2. 按使用的机床分类

按使用夹具机床可分为车床夹具、铣床夹具、钻床夹具、镗床夹具、磨床夹具、齿轮加工机床夹具和其他机床夹具等。

3. 按夹紧动力源分类

按动力来源的不同可分为手动夹具、气动夹具、液压夹具、电动和磁力夹具、气-液增力夹具、真空夹具等。

2.1.3 夹具的组成

机床夹具的种类和结构虽然很多，但一般由下列部分组成。

1. 定位元件（装置）

即确定一批工件在夹具中占有正确位置的元件或装置。图 2-1 中的定位销 3 就是定位元件，通过它可以使该批套筒工件在夹具中处于正确的位置。

2. 夹紧元件（装置）

其作用是将工件压紧夹牢，保证工件在加工过程中由于自重或受到切削力、震动等外力作用时不离开已确定的正确位置。例如，图 2-1 中的螺母 4、垫圈 5、定位销 3 等组成的螺旋夹紧机构。

3. 刀具导向元件（装置）

用于确定刀具相对于夹具的位置。对于钻头、扩孔钻、绞刀、镗刀等孔加工刀具用导向元件，对于铣刀、刨刀等用对刀装置，如图 2-1 中的快换钻套 1、铣床夹具的对刀块等。

4. 连接元件

连接元件用来保证夹具和机床工作台之间的相对位置。铣床夹具用定位键与铣床工作台上的 T 形槽相配定位，再用螺钉夹紧。

5. 夹具体

夹具体用于连接夹具上各元件及装置，使其成为一个整体的基础件，并通过它与机床有关部位连接，以确定夹具相对于机床的位置，如图 2-1 中的夹具体 6。

6. 其他元件（装置）

其他元件是指用于满足夹具特殊功能的其他元件或装置。例如，使工件在一次安装中多次转位加工不同位置上的表面所设置的分度装置；工件被夹紧后起自锁作用的锁紧装置；用于气压、液压夹具中的气缸、油缸的动力装置等。

并不是每一个夹具都要包括上述各部分，但是无论哪种夹具都必须有定位元件和夹紧装置。

2.2 定位原理及定位元件

对一批工件来说，不论先后，每一个工件都占据预先规定的位置。要做到这一点，需要采取两方面的措施：一是将夹具安装在机床上，经过调整后使夹具、刀具及机床之间获得正确的相对位置，即所谓的夹具在机床上的对定；二是使工件在夹具中占有一个正确的位置，即工件在夹具中的定位。

本节内容将主要围绕着工件的定位、定位原理、定位方式、定位元件及各种定位元件所能限制的自由度和计算各种定位方式所产生的定位误差等问题进行讨论。

2.2.1 定位原理

1. 工件定位的基本原理

工件任何一个物体在三维空间中相对于三个互相垂直的坐标系 $OXYZ$ 来说，都有六个自由度，最多也只能有六个自由度，即沿 X 、 Y 、 Z 三个坐标轴的移动，以 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 表示，以及绕着 X 、 Y 、 Z 轴的转动，用 $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$ 、 $\bar{\gamma}$ 表示，如图 2-2 所示。

如果说某物体在某一方向上的自由度被限制住了，实际上是说该物体在该方向上有了一个确定的位置。当物体的六个自由度完全被限制，该物体在坐标系中的位置就完全被确定了。

在设计定位时，一般是用一个定位支承点来限制工件运动的一个自由度，用合理分布的六

个支承点来限制工件的六个自由度, 这样就可使工件在夹具中的位置完全确定, 如图 2-3 所示。在 XOY 平面上设置三个定位支承点 1、2、3, 使长方体的 A 面与其接触, 限制了长方体的沿 \bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{y} 三个自由度; 在 YOZ 平面上设置两个支承点 4、5, 使之与长方体的 B 面接触, 这又限制了长方体的 \bar{x} 、 \bar{z} 两个自由度; 最后在 XOZ 平面上设置一个支承点 6, 它与长方体的 C 面接触, 可限制长方体的 \bar{y} 自由度。这样, 该长方体在垂直三坐标系中的六个自由度就全部被限制住了, 它的空间位置也就完全确定了。

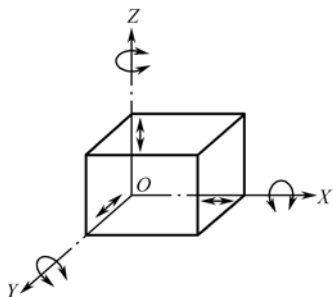


图 2-2 物体六个自由度

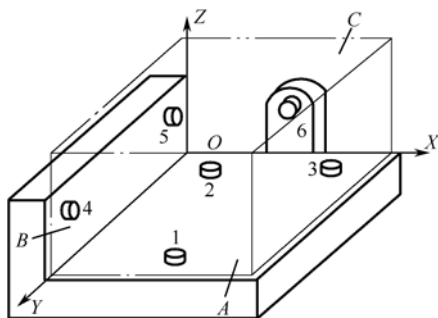


图 2-3 工件的六点定位

综上所述, 可得出工件在夹具中定位的基本原理: 工件在夹具中的位置有六个自由度, 要限制这六个自由度需要在夹具上按一定要求, 布置六个支承点或相当于支承点的定位元件与工件紧密接触或配合, 其中每一个支承点相应地消除一个自由度, 从而使工件在夹具中占有一个完全确定的位置, 这就是通常所说的“六点定位原理”。

当工件的形状及工件的定位基准不同时, 定位点的分布应根据具体情况采取相应的改变。但应注意, 不论定位点的定位形式怎么改变, “六点定则”不能改变, 即六个支承点必须消除工件的六个自由度。如图 2-4 所示为盘状工件的六点定位情况: 平面放在三个支承点上, 消除 \bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{y} 三个自由度; 圆柱面与两个支承点相靠, 消除 \bar{x} 、 \bar{y} 两个自由度; 槽的侧面用一个支撑点, 消除 \bar{z} 这一个自由度。

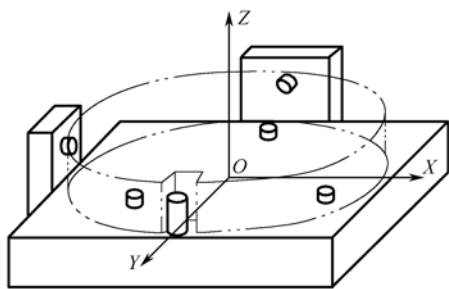
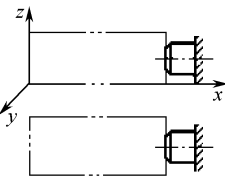
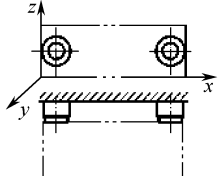
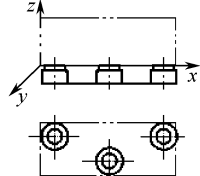
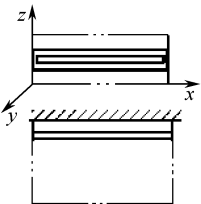
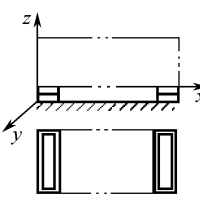
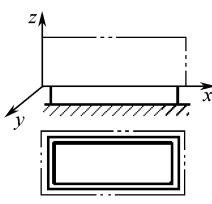
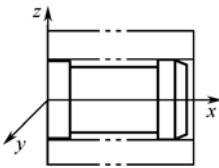
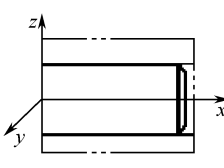
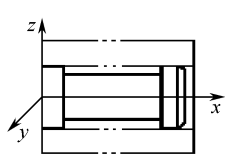
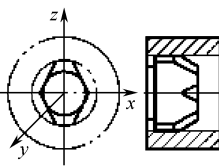
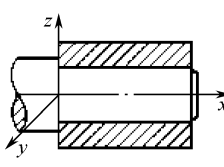
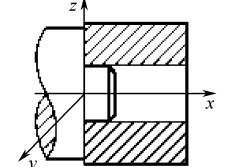
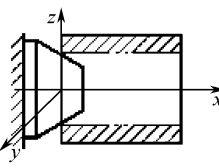
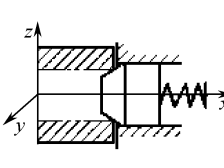
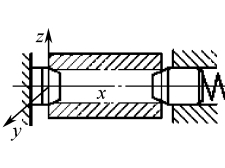


图 2-4 盘类零件的六点定位

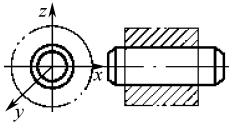
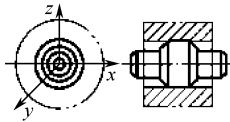
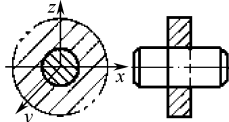
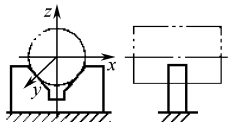
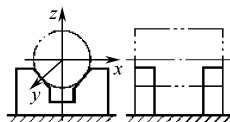
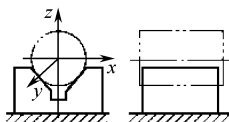
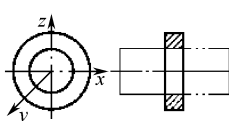
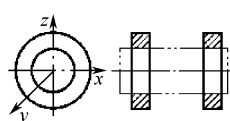
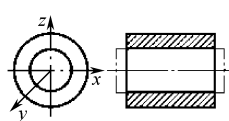
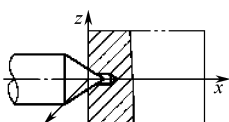
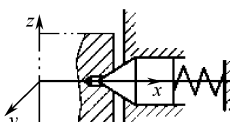

需要说明的是, “六点定位原理”是把夹具中的定位元件抽象成支承点, 每个支承点消除工件的一个自由度, 最终将工件的六个自由度都消除。但实际上夹具有时使用的是一些具体的定位元件, 并不都是直接由支承点组成的, 往往是通过定位元件上的具体定位表面体现出来的。工件上的定位基面与定位元件上相对应的定位表面合称为定位副。

表 2-1 中列出了常用的定位元件及其在定位时相当于几点支承的情况。

表 2-1 常用定位方式所能限制的自由度

工件的定位面		夹具的定位元件			
平面	支承钉	定位情况	1 个支承钉	2 个支承钉	3 个支承钉
		图示			
		限制的自由度	\bar{x}	\bar{y} 、 \bar{z}	\bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{y}
	支承板	定位情况	一块条形支承板	二块条形支承板	一块矩形支承板
		图示			
		限制的自由度	\bar{y} 、 \bar{z}	\bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{y}	\bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{y}
圆孔	圆柱销	定位情况	短圆柱销	长圆柱销	两端短圆柱销
		图示			
		限制的自由度	\bar{y} 、 \bar{z}	\bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\varphi}$ 、 \bar{z}	\bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\varphi}$ 、 \bar{z}
	菱形销	定位情况	菱形销	长销小平面组合	短销大平面组合
		图示			
		限制的自由度	\bar{z}	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 \bar{y} 、 \bar{z}	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 \bar{y} 、 \bar{z}
	圆锥销	定位情况	固定锥销	浮动锥销	固定/浮动锥销组合
		图示			
		限制的自由度	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z}	\bar{y} 、 \bar{z}	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 \bar{y} 、 \bar{z}

续表

工件的定位面		夹具的定位元件			
圆孔	心轴	定位情况	长圆柱心轴	短圆柱心轴	小锥度心轴
		图示			
		限制的自由度	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\omega}$	\bar{x} 、 \bar{y}	\bar{x} 、 \bar{y}
外圆柱面	V形块	定位情况	一块短V形块	两块短V形块	一块长V形块
		图示			
		限制的自由度	\bar{x} 、 \bar{y}	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\omega}$	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\omega}$
	定位套	定位情况	一个短定位套	两个短定位套	一个长定位套
		图示			
		限制的自由度	\bar{x} 、 \bar{y}	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\omega}$	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\omega}$
	圆锥孔	顶尖和锥度心轴	定位情况	固定顶尖	浮动顶尖
图示					
限制的自由度			\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z}	\bar{y} 、 \bar{z}	\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 $\bar{\omega}$

夹具中所说的定位元件的大小、长短是针对工件而言的，一般当定位元件的定位表面与工件定位面接触处大于工件一半以上时，认为是大或者长；小于工件一半以下时，认为是小或者短。如图 2-5 所示，图 2-5（a）所示为大端面、短心轴；图 2-5（b）所示则是小端面、长心轴。

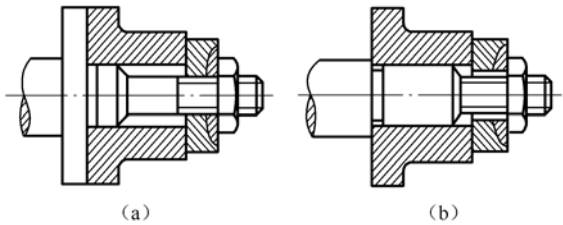


图 2-5 端面与心轴定位

另外，用定位支承点或定位元件去限制工件在空间的自由度时，定位支承点或定位元件必须与工件定位面始终保持紧密接触或配合，不得脱离。此外，在分析定位支承点起定位作用时，

是指工件在该方向上有了确定的位置,即工件在某个方向的自由度被限制住了,而不是指工件在受到使工件脱离定位支承点的外力时也不运动。相反,若工件在夹紧力的作用下完全被限制住了移动或转动自由度,并不意味着工件已被完全定位了。使工件在外力作用下不能运动,是“夹紧”的任务,这是后续要讨论的问题。“定位”与“夹紧”是两个不同的概念,应予严格区分。

2. 限制工件自由度与加工要求的关系

1) 完全定位

若工件的六个自由度在夹具定位中都被限制住时,则称为完全定位,如图 2-3、图 2-4 所示都是完全定位的例子。

2) 不完全定位

在夹具中工件六个自由度没有被全部限制,但能满足加工要求的定位,称为不完全定位。

不完全定位一般出现在工件定位时允许保留某些方面的自由度不被限制的情况下。如图 2-6 (a) 所示,在球面上钻一通孔时,只需要限制 \bar{x} 、 \bar{y} 两个自由度;如图 2-6 (b) 所示,在套筒上铣一平面时,应限制 \bar{z} 、 \bar{x} 两个自由度。由此可以看出,工件定位时所消除的自由度数,是根据具体的加工要求来定的,并不是六个自由度都消除,不完全定位是允许的。

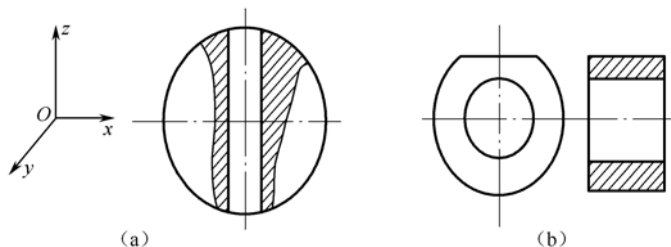


图 2-6 不完全定位

3) 过定位

若几个定位支承点都重复限制了工件同一个或几个自由度,称为过定位,也叫重复定位。图 2-7 (a) 所示是加工连杆大孔时的定位情况,连杆以长销、支承板及挡销进行定位,其中长销相当于四点定位,限制了 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{x} 、 \bar{y} 四个自由度;支承板相当于三点定位,消除工件的 \bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{y} 三个自由度;挡销为一点定位,消除工件 \bar{z} 一个自由度。显然在定位方案中,工件的 \bar{x} 、 \bar{y} 自由度被长销和支承板重复限制,属于过定位。从图 2-7 (b)、(c) 中可以很直观地看出,过定位现象是不好的。因为工件的端面和小头孔不可能绝对垂直,定位销也不可能与支承板绝对垂直,所以,在夹紧工件时定位元件就可能发生变形,使工件的端面与支承板的定位面不能完全接触,这样必然影响加工精度。将定位销改成短销就合理了,如图 2-7 (d) 所示。

通过上例可知,产生过定位的原因主要是工件各定位基准面之间存在位置误差,或夹具上各定位元件之间的位置不绝对准确等因素造成的。为了减少或消除重复定位造成的不良后果,可采取如下措施:

(1) 改变不合理的定位结构。改变定位元件的结构实际上就是去除原定位元件的某些定位作用,使工件不重复定位。在如图 2-7 所示的连杆定位方案中,将长销换成短销即可。

(2) 提高工件定位基准之间以及定位元件工作表面之间的位置精度,以减少重复定位对工序加工精度的影响。

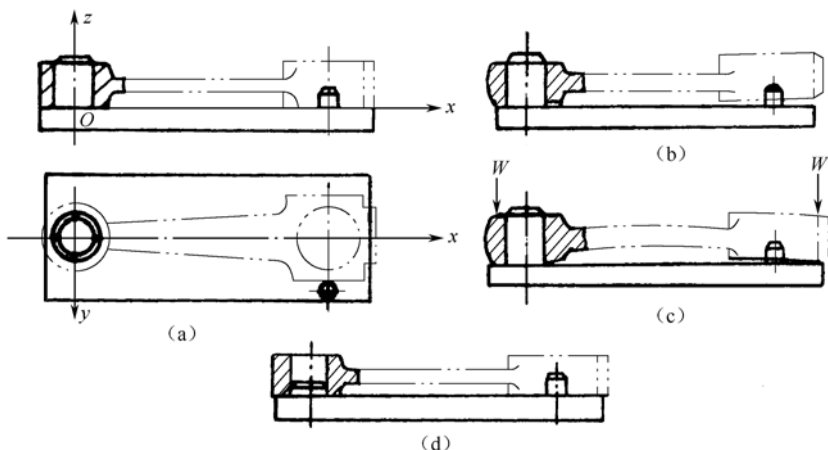


图 2-7 连杆定位方案

(3) 撤去多余的固定支承, 准确安排支承位置。

一般情况下, 应尽量避免采用过定位。但是在某些特殊情况下, 采用过定位也是允许的。例如对于刚性差的工件, 为了避免加工时的变形, 也常采用过定位。图 2-8 所示为加工细长轴时的情况, 为了增强刚度, 减小切削力引起的变形, 工件一端用三爪卡盘定心夹紧, 另一端用尾顶尖顶住。当三爪卡盘夹持工件的部分较长时, 可限制工件 \bar{y} 、 \bar{z} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 四个自由度, 尾顶尖与三爪卡盘共同限制工件的 \bar{y} 、 \bar{z} 两个自由度, 故属于过定位。

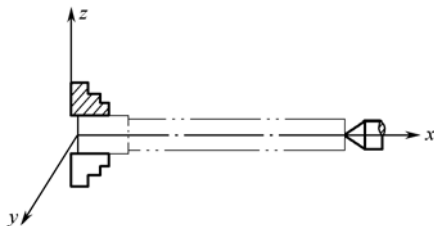


图 2-8 细长轴的定位

4) 欠定位

工件在夹具中定位时, 若实际限制的自由度个数少于工序加工要求所必须限制的自由度数目, 即工件定位不足, 此时称为欠定位。

如图 2-6 所示的工件中, 若在球面上钻孔时, 球的 \bar{x} 、 \bar{y} 自由度没被限制, 那么所加工孔的中心线将不能通过球的球心。这些现象的后果是导致零件成为废次品, 故欠定位不论在什么情况下都不允许发生。

2.2.2 定位元件

1. 对定位元件的基本要求

在加工中可根据工件的结构形状、加工要求、生产条件来确定具体的定位方法, 各种定位方法是通过各类定位元件来实现的, 如平面、外圆柱面、圆孔、型面、组合面等。夹具上的定位元件除起定位作用外, 多数情况下还要承受工件的重量、夹紧力和切削力, 因此要求定位元件具有足够的精度、强度和刚度以及良好的耐磨性和工艺性。

2. 典型的定位元件及限制的自由度

1) 平面定位常用定位元件

工件以平面定位, 是指工件的定位基准为平面, 有粗基准和精基准两种情况。不论平面定

位基准是上述中的哪一种，与其对应的定位元件都是主要支承和辅助支承两大类。只不过在设计定位方案时，应根据粗基准或精基准选择不同的定位元件。

当定位基准为粗基准时，一般不采取完整的定位平面作为夹具的定位元件，而是采用位置固定的三个支承点，为保证工件定位稳定，应使三个支承点所形成的支承面足够大，原因是此时的基准表面是粗糙不平的。如果夹具上的定位表面也做成完整的平面，则在定位副相互接触时，工件的粗基准面会以其最高的三点与定位元件的平面接触，如图 2-9 所示。在同一批工件中每个工件的三个接触点所形成的支承三角形的面积和位置都不相同，故导致这批工件定位不稳定，引起定位误差的增大。当然，并不是所有粗基准都采用三支承点来定位，当粗基准平面很狭窄或工件为一薄板，其刚度不足时，夹具只能采用完整平面来实现定位。

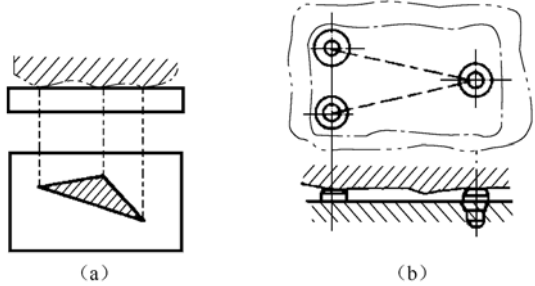


图 2-9 粗基准定位

平面定位的主要形式是支承定位，夹具上常用的支承元件有以下几种。

(1) 主要支承：能限制自由度起定位作用的支承。它又可分为如下几种。

① 固定支承。在夹具体上，定位元件的位置固定不变时称为固定支承。它主要有各种支承钉和支承板，如图 2-10 所示。其中，球头支承钉用于大平面的粗基准定位，尽量将三个球头支承钉布置得较远，以保证接触点的位置相对稳定。平头支承钉与工件接触面积大，不易磨损，适用于已加工平面的定位。网纹支承钉的摩擦系数较大，适用于侧面定位，可防止工件受力后滑动。支承板中 A 型的结构简单、制造方便，但孔内切屑不易清除干净，所以适用于侧面定位。B 型结构易于保证工作表面清洁，适用于底面定位。支承钉和支承板的结构、尺寸均已标准化，设计时可查国家标准《机床夹具零件及部件》手册。

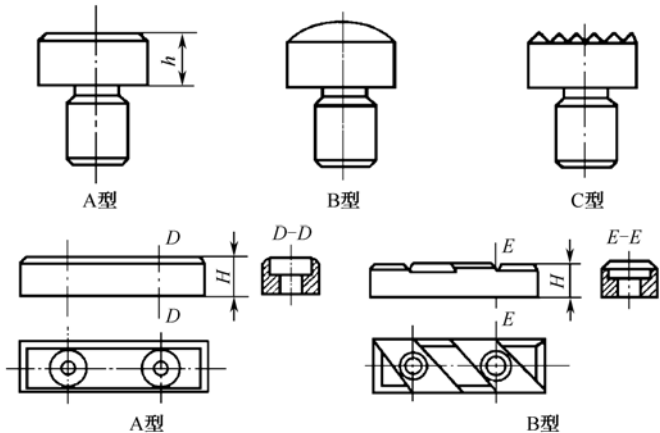


图 2-10 不同类型的固定支承

② 可调支承。夹具体上支承点的高低可以调节的定位元件称为可调支承。常用的几种可调支承结构如图 2-11 所示, 其组成均为螺钉、螺母形式, 广泛应用于可调夹具和成组夹具中。当工件的定位表面不规整或工件毛坯质量又不高时, 宜采用可调支承。

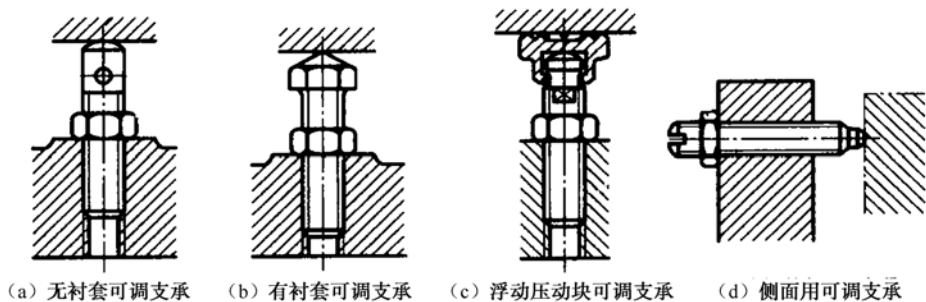


图 2-11 不同类型的可调支承

③ 自位支承(浮动支承)。自位支承是指支承点的位置在工件定位过程中, 随工件定位基准面位置的变化而自动与之适应的定位元件。自位支承往往有多于一个的支承点, 在定位过程中通过自身调节, 使每个支承点均与工件定位面接触。如图 2-12 所示为几种常见的自位支承元件, 图 2-12 (a)、(b) 所示为杠杆式两点自位支承, 图 2-12 (c) 所示为球面三点式自位支承, 图 2-12 (d) 所示为楔块三点式自位支承。自位支承的特点是通过彼此之间的浮动环节来实现单点支承定位作用, 即不论自位支承与工件有几个接触点, 其作用只相当于一个固定支承, 只限制工件的一个移动自由度。图 2-12 (a) 中定位支承点有两个, 如果不考虑转动环节, 两个支承点应消除两个自由度。但由于加了转轴, 转动的自由度就不能被限制, 而只能消除一个上下移动的自由度。

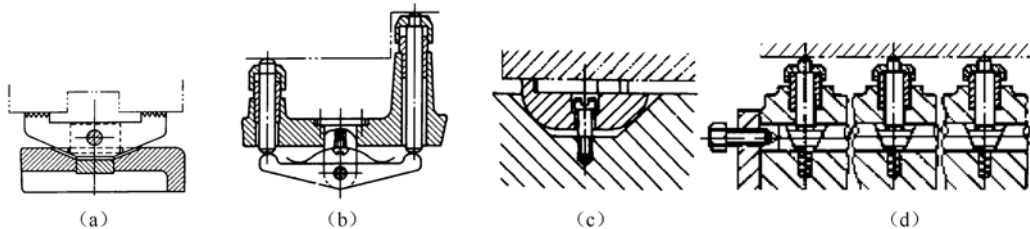


图 2-12 几种型式的自位支承

夹具采用自位支承的优点主要表现在: 增加了定位的接触点, 从而增加了定位的稳定性; 同时每个支承点所承受的夹紧力减小了, 减少了工件变形的可能性。其缺点是: 由于定位点之间的浮动, 有可能在外力作用下破坏工件的原始定位, 因而增加了工件定位的不可靠性。解决的办法一般是采用带锁紧的浮动支承, 当工件定好位后, 用锁紧机构将其锁住, 使其不再产生浮动。

(2) 辅助支承。辅助支承是在工件定位定好后才参与工作的, 不起限制工件自由度的作用, 只起增加刚度或防止倾覆的作用。

在实际生产中, 形状不规则的工件常常在夹紧力、切削力、工件重力等外力作用下发生倾覆或变形。图 2-13 (a) 所示为在一阶梯轴上铣键槽, 为保证键槽的位置精度, 采用长 V 形块定位。在未夹紧工件之前, 由于工件的重心超出主要支承面而使一端下垂, 进而破坏工件的定位。为此, 需在工件重心部位的下方设置辅助支承, 先实现预定位, 然后在夹紧力作用下实现

主要定位元件的准确定位。图 2-13 (b) 所示在精刨车床床鞍的下部导轨面时, 虽已选择了燕尾导轨面及一侧面为定位基准, 但由于其定位基准与定位元件接触面积较小, 在加工时工件右端定位不够稳定且易受力变形, 为了保证精刨床鞍导轨面的加工精度, 也必须在工件右端设置两个不破坏工件原有定位的辅助支承。

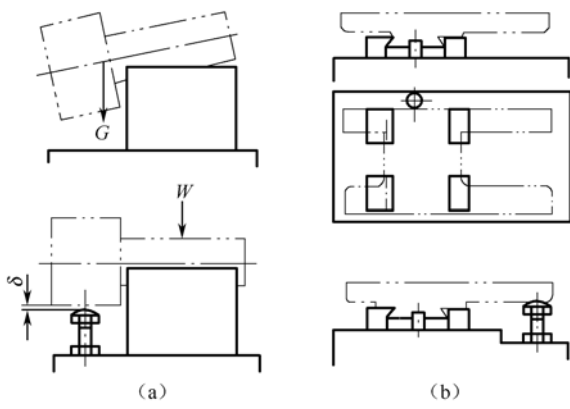


图 2-13 辅助支承应用

图 2-13 所示的辅助支承, 虽在结构上与图 2-11 (b) 所示的可调支承相同, 但在作用上却有很大区别, 选用时要特别注意, 以免混淆。

2) 工件以孔定位常用定位元件

工件以圆孔定位通常属于定心定位 (定位基准为孔的轴线), 常用的定位元件有定位销、心轴、圆锥体等。

(1) 定位销。图 2-14 所示为几种常用的定位销。一般定位销分为固定式 (如图 2-14 (a)、(b)、(c) 所示) 和可换式 (如图 2-14 (d) 所示)。固定式是指定位销与夹具体之间采用过盈配合, 直接压在夹具体上, 这种定位销结构简单, 但不便于更换。可换式则便于更换, 主要是在定位销与夹具体之间装有衬套, 此时, 定位销与衬套内径采用间隙配合, 并用螺母拉紧, 衬套与夹具体之间则采用过渡配合。由于定位销与衬套之间存在装配间隙, 所以其位置精度比固定式定位销的低。所有定位销的定位端头部均做成 15° 的大倒角并抛光, 以便工件顺利套入。

对于中、小尺寸的定位销结构已经标准化了, 设计时可查找相应的夹具设计手册。而大尺寸或有特殊要求的定位销, 则可设计成非标准的结构。

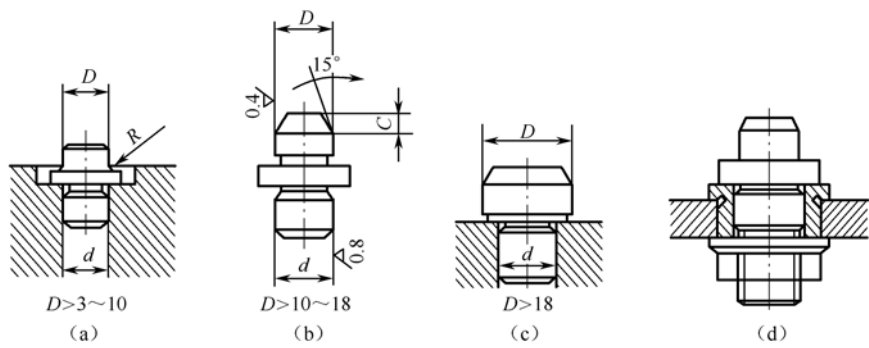


图 2-14 常见的固定式定位销

(2) 刚性心轴。图 2-15 所示为常用的几种心轴结构形式。图 2-15 (a) 所示为有轴肩间隙配合的圆柱心轴, 故定位精度不高, 但装卸工件较方便。此时, 工件的定位是靠工件的孔与端面联合定位。夹紧是通过夹紧螺母与开口垫圈快速实现的。

图 2-15 (b) 所示为无轴肩过盈配合心轴, 它主要由引导部分 1、工作部分 2 及与传动装置相联系的部分 3 组成。当工件孔的长径比 $L/D > 1$ 时, 心轴的工作部分应稍带锥度。该心轴定心精度高, 还可以加工端面, 心轴上的凹槽就是供车削工件端面时退刀用的。但此心轴装卸工件较麻烦, 由于工件的安装是靠压入、压出来实现的, 故易损伤工件的定位基准孔, 且当压力过大时工件还会产生过分变形。

图 2-15 (c) 所示为花键心轴, 当工件的定位基准是花键孔时用花键心轴。该轴的结构及配合应根据工件的不同定心方式来确定。同样, 当工件孔的长径比 $L/D > 1$ 时, 其工作部分也应稍带锥度。

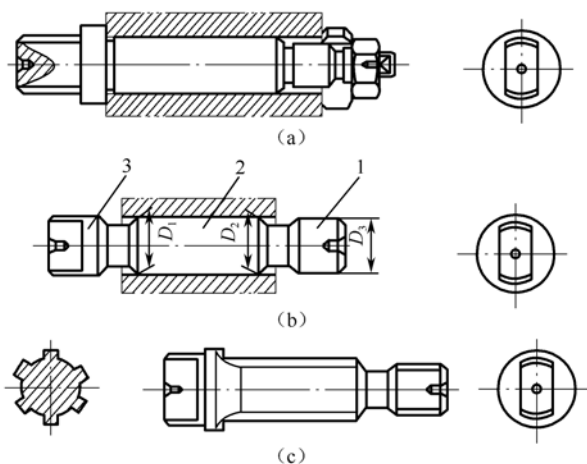


图 2-15 常用的几种刚性心轴

(3) 圆锥销。前述几种定位元件中, 除了过盈配合心轴外, 定位副间都存在间隙, 因此定心精度不高, 无法满足高加工精度要求。在精加工场合, 常用的定心元件为小锥度心轴或圆锥销等。

图 2-16 所示为工件以内孔在小锥度心轴上定位, 常用锥度为 $1:1000 \sim 1:5000$ 。工件与定位元件间无间隙, 故定心精度高。定位时, 工件楔紧在心轴的锥面上, 由于孔表面的局部弹性变形, 使其与心轴在 L_k 长度上过盈配合实现定位。同时, 在夹紧力作用下无须再夹紧工件。

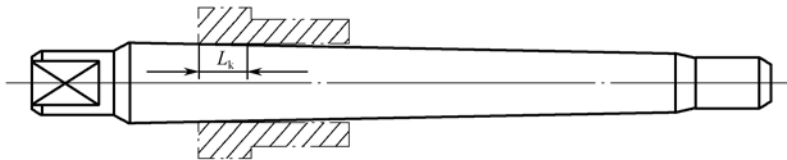


图 2-16 小锥度心轴

图 2-17 所示为工件以孔端在圆锥销上的定位方式。其中, 图 2-17 (a) 所示用于粗基准, 图 2-17 (b) 所示用于精基准, 均限制了工件的 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 三个自由度。工件以单个圆锥销定位时容易产生倾斜, 一般采用如图 2-18 所示的组合定位方式, 其中图 2-18 (a) 所示为圆锥-圆柱组合心轴, 图 2-18 (b) 所示为工件在双圆锥销上定位, 这两种定位方式均限制了工件的

五个自由度。

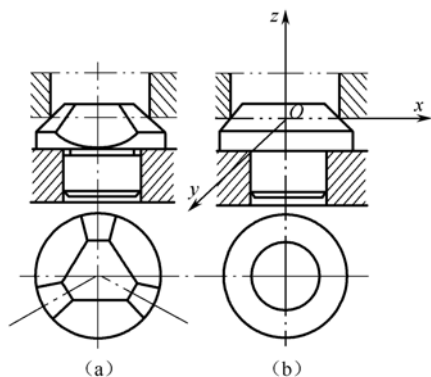


图 2-17 圆锥销

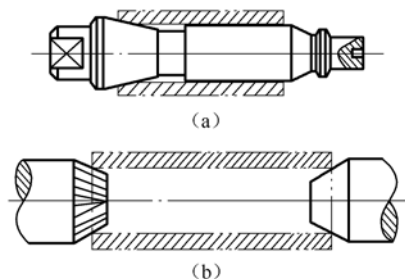


图 2-18 组合式圆锥销定位

3) 工件以外圆定位常用定位元件

工件以外圆柱面定位是指工件的定位基准为圆柱的轴心线或外圆柱表面时的情况。前者为定心定位，后者为支承定位。定心定位中常用的定位元件为定位套、自动定心三爪夹盘、弹簧夹头及其他自动定心机构。工件以外圆柱面与套筒配合定位也属于定心定位，其定位分析与工件以圆柱孔在心轴上定位一样，只是用套筒或卡盘代替了心轴或柱销，锥套代替了锥销。

工件用外圆柱面支承定位包括支承板定位和 V 形块定位，工件与定位元件接触的是母线，实际确定的是母线的位置，所以工件的定位基准可以认为是外圆柱面上的母线。

(1) 定位套。常用定位套如图 2-19 所示，其中图 2-19 (a)、(b) 所示为短定位套和长定位套，定位套的端面也同时起定位作用，图 2-19 (c) 所示为锥面定位，图 2-19 (d) 所示为便于装卸工件的半圆孔定位套，上半圆起夹紧作用，常用于曲轴等不宜以整圆定位的轴类工件定位。图 2-19 (a)、(b)、(c) 中的定位套可根据被加工工件的批量及工序加工精度要求，设计成固定式和可换式的。固定式定位套在夹具中的位置精度比可换式的高。

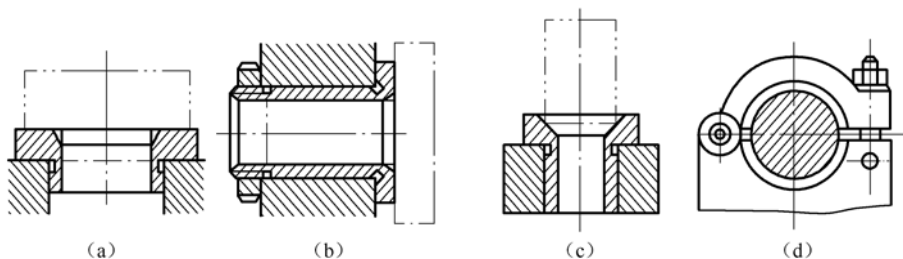


图 2-19 外圆表面的套筒定位

(2) V 形块。外圆柱面采用 V 形块定位应用最广，如图 2-20 所示，适用于完整的外圆柱面定位，也适用于非完整的外圆柱面及局部曲线柱面的定位。V 形块还能与其他定位元件组合使用，通过做成活动形式减少其限制自由度的功能。V 形块的结构形式很多，可以根据工件的结构、尺寸和基准面的精度选用。

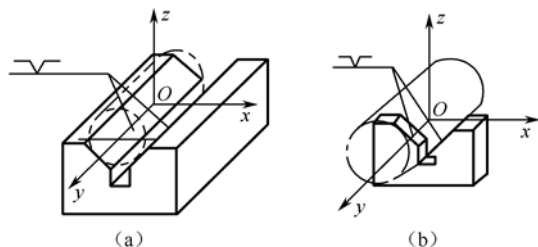


图 2-20 V 形块定位

4) 工件以其他表面定位

工件除了以平面、圆柱孔和外圆表面定位外,有时也以其他形式表面定位。工件以圆锥孔定位时常用的定位元件为锥形心轴和顶尖,如图 2-21 所示。

(1) 锥形心轴。锥形心轴可限制工件的五个自由度,图 2-21 (a)、(b) 所示为工件以圆锥孔在锥形心轴上的定位,当锥角小于摩擦自锁角时,为了便于卸下工件,可在心轴大端装一推出工件用的螺母。

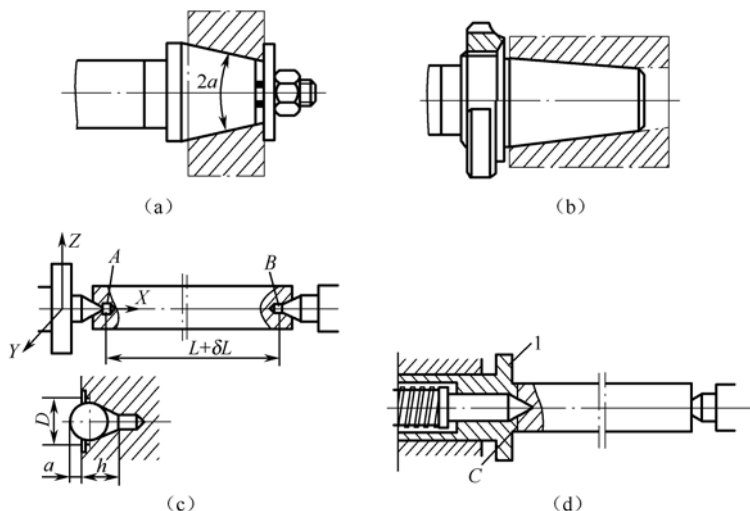


图 2-21 圆锥孔定位的常用定位元件

(2) 顶尖。加工轴类零件时,常在工件端面专门加工出中心孔作定位基准,与之相配成定位副的定位元件就是顶尖。如图 2-21 (c) 所示,工件左端用轴向固定的前顶尖,工件右端用轴向可移动的后顶尖,二者联合限制工件除绕轴线转动以外的五个自由度。当工件定位需要准确控制轴向位置时,钻中心孔应严格控制直径 D 或深度 h ,以便定位时能用标准钢球控制尺寸 a ; 否则应采用图 2-21 (d) 所示的结构,此时前后顶尖只起定心作用,限制四个自由度,轴向自由度由工件 1 工作端面限制。

5) 元件以组合表面定位

当工件以单一表面作定位基准不能限制需要限制的自由度时,常采用平面、外圆、内孔等表面进行组合定位。在组合定位中,首先要解决各基准面之间的主次关系。一般情况下,定位点数最多的定位表面称为第一定位基准面或主基准,定位点数次多的表面称为第二定位基准面或导向面,定位点数为 1 的定位表面称为第三定位基准面或止动面。常见的组合定位形式主要有平面与平面的组合、平面与外圆表面的组合、平面与其他表面的组合。

生产实践中用一面两孔组合定位的工件很多,如箱体、盖板、连杆等的加工都需以一面两孔定位。两定位孔可以是工件上固有的孔,也可以是附设的工艺孔。用一面两孔定位可以实现一次装夹中加工尽量多的工件表面,容易实现基准统一,有利于保证工件各表面之间的相互位置精度。

如图 2-22 所示,工件以一面两孔定位时,定位元件是一个大支承板和两个与该板垂直的定位销。工件定位平面为主基准,限制 \bar{z} 、 \bar{x} 、 \bar{y} ;与左圆柱销相配的孔为第二基准,限制 \bar{x} 、 \bar{y} ;与削边定位销相配的孔为第三基准,只限制 \bar{z} 。若右定位销是圆柱销,则将在 X 方向造成过定位。由于两孔中心距和两销中心距都有制造误差,可能发生干涉而使工件不能在夹具上实现定位。为了消除中心距误差的影响,使每个工件都能顺利地装夹,必须使右定位销处定位副的间隙增大,即减小定位销的直径,减小量必须足以消除由于两孔和两销中心距反向极限误差造成的干涉。但若使定位副配合间隙过大,将引起工件两孔中心连线的转角误差增大,对 \bar{z} 的限制不准确,从而影响加工精度。为解决这个矛盾,可把右销沿两销连心线方向削扁,使定位副在连心线方向间隙增大,而垂直于连心线方向仍保持原间隙不变。于是,右销成为削边定位销,又称菱形定位销。菱形定位销不再限制 \bar{x} ,只与圆柱销联合限制 \bar{z} 。

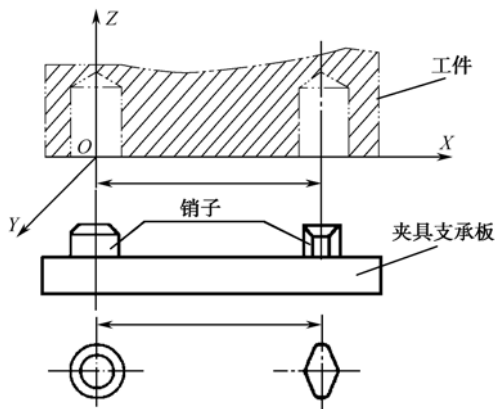


图 2-22 一面两孔定位

2.3 定位误差分析

设计夹具过程中选择和确定工件的定位方案,除了根据定位原理选用相应的定位元件外,还必须对选定的工件定位方案能否满足工序的加工精度要求做出判断,为此就需要对可能产生的定位误差进行分析和计算。

2.3.1 定位误差及产生的原因

由前所知,工件在夹具中的位置是以其定位基面与定位元件相接触或相配合来确定的。依据六点定位原则,可按工件的加工要求确定其定位方式并选用相应的定位元件,使工件定位。由于定位基面和定位元件工作表面以及工件各表面间的制造误差,会使一批工件在夹具中的实际位置不一致,从而引起工序尺寸或工件有关表面间位置要求的加工误差。这种由于定位不准而造成某一工序在工序尺寸或位置要求方面的加工误差,称为定位误差(用 Δ_D 表示)。下面具体分析定位误差产生的原因。

图 2-23 (a) 所示为一套形工件, 本工序是在其上钻一通孔, 要求保证的工序尺寸为 $H_{-T_H}^0$, 所采用的钻床夹具如图 2-23 (b) 所示。被加工孔的工序基准为工件外圆 $d_{-T_d}^0$ 的下母线 A ; 工件首先以其端面为定位基准与支承板接触, 再以其内孔 $D_{+T_D}^0$ 的中心线 O 为定位基准与短圆柱定位销配合, 共限制五个自由度, 实现了部分定位。

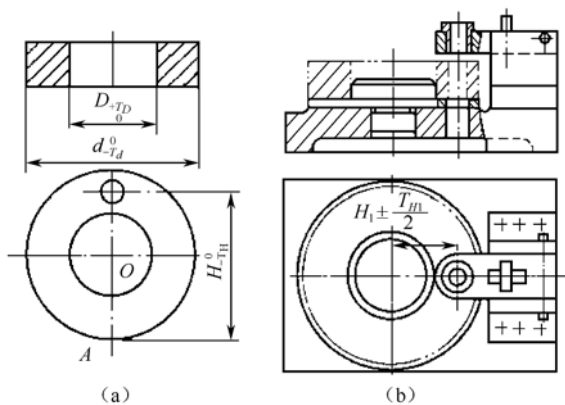


图 2-23 钻孔工序简图及夹具

若被加工的这一批工件的内孔及定位销均无制造误差, 且工件内孔与定位销无配合间隙, 则工件定位时的内孔中心线、外圆中心线均与定位销中心线相重合。在这种情况下, 这批工件的内孔中心线及它们外圆下母线的位置是完全一致的。在调整法加工中, 钻头相对于夹具的位置已由钻套位置确定, 这时各工件将获得完全相同的工序尺寸, 不存在由定位不准而引起的加工误差。

实际上, 工件内孔、外圆以及定位销的制造误差是必然存在的, 且通常工件内孔和定位销之间采用间隙配合, 以利于工件的装卸, 从而使得定位时各工件的内孔中心线及外圆下母线可能在一定范围内变动。这样, 即使钻头的位置是完全确定的, 由于工件位置的不一致, 将会造成工序尺寸在一定范围内变动, 这个变动就是因为定位不准而引起的加工误差。

当夹具上定位销 $d_{-T_d}^0$ 、工件内孔按 $D_{+T_D}^0$ 制造, 且定位销与工件内孔的最小配合间隙为 Δ_{\min} 时, 这批工件的定位基准 O 将由于配合状态的不同可能在一定范围内变动, 图 2-24 所示为它们的最大变动范围, 其中 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 为定位基准 O 相对其理想位置 (定位销轴线) 变动的几个极端位置。在这种情况下, 即使这批工件外圆尺寸绝对一致, 由于定位基准相对于理想位置的位置变动, 将引起工件母线 A 相对于钻头位置的不一致, 因此造成这批工件工序尺寸 H 的加工误差。

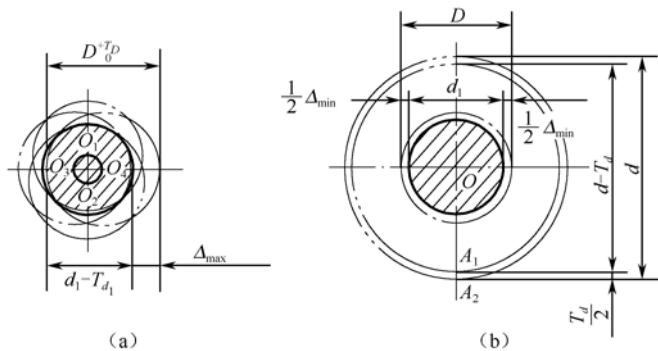


图 2-24 定位误差分析

定位基准 O 相对于其理想位置的最大变动量称为定位基准的位置误差, 简称基准位置误差, 用 Δ_y 表示。在本例中, 基准位置误差可由图中关系求得, 即

$$\Delta_y = O_1O_2 = O_3O_4 = \Delta_{\max} = (D + T_D) - (d + T_{d1}) = T_D + T_{d1} + \Delta_{\min}$$

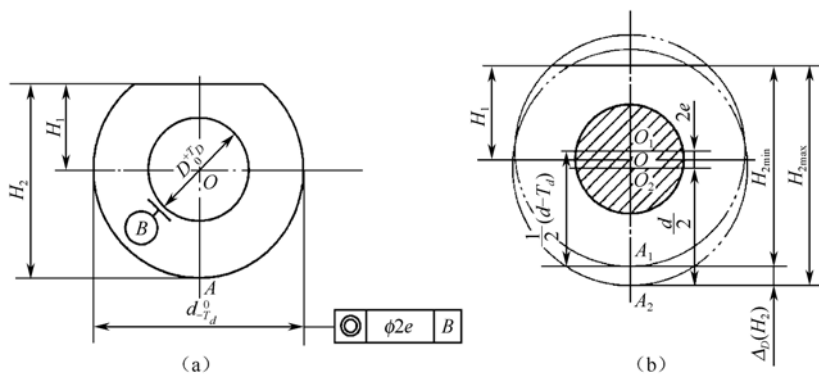


图 2-25 铣平面工序简图及定位误差分析

如图 2-25 所示为在套类工件上铣平面的工序简图。如果定位基准 O 相对于其理想位置没有变动, 采用过盈配合的定位销或可涨心轴定位, 如图 2-25 (b) 所示, 则不存在基准位置误差, 即 $\Delta_y = 0$ 。但对于 H_2 尺寸来说, 由于工件外圆尺寸存在制造误差, 仍会使得工序基准 A 与定位基准理想位置 O 的相对位置不一致, 从而造成这批工件工序尺寸的加工误差。工序基准 A 相对定位基准 O (孔中心线) 的最大位置变动量称为工序基准与定位基准不重合误差, 简称基准不重合误差, 用 Δ_B 表示。显然, 当工序基准与定位基准重合时, $\Delta_B = 0$ 。可见, 在本例中出现的加工误差是由于工序基准与定位基准不重合引起的 (外圆与内孔不同轴)。

2.3.2 定位误差分析计算

由上述实例分析可以进一步明确, 定位误差是指一批工件采用调整法加工, 仅仅由于定位不准而引起工序尺寸或位置要求的最大可能变动范围。定位误差主要是由基准位置误差和基准不重合误差组成的。可以得到如下结论:

(1) 定位误差只产生在采用调整法加工一批工件的条件下, 若一批工件逐个按试切法加工, 则不存在定位误差 Δ_D 。

(2) 定位误差是由于工件定位不准而产生的加工误差。其表现形式为工序基准相对于加工表面可能产生的最大尺寸或位置的变动范围。它的产生原因是工件的制造误差、定位元件的制造误差、两者的配合间隙及基准不重合等。

(3) 定位误差由基准位置误差 Δ_y 和基准不重合误差 Δ_B 两部分组成, 即

$$\Delta_D = \Delta_B \pm \Delta_y \quad (2-1)$$

但并不是在任何情况下这两部分都存在。当定位基准无位置变动, 则 $\Delta_y = 0$; 当定位基准与工序基准重合, 则 $\Delta_B = 0$ 。

按定位误差的定义, 根据所画出的一批工件定位可能产生定位误差的两种极端位置, 再通过几何关系直接求得; 也可按定位误差的组成, 由式 (2-1) 计算得到。但计算时应注意 Δ_B 和 Δ_y 方向的异同, 以确定公式中的加减号。加减号的确定方法如下: 首先分析定位基面直径由小

变大(或由大变小)时,定位基准的变化方向;再分析当定位基面直径做同样变化时(设定位基准的位置不变化),分析工序基准的变动方向;最后判断两者的变化方向,相同时,取“+”号,相反时,取“-”号。

1) 基准不重合误差 Δ_B 的计算

如前例在套筒类零件上铣平面,由图 2-25 所示可知:

$$\Delta_B = H_{2\max} - H_{2\min} = \left(\frac{d}{2} + e\right) - \left(\frac{d}{2} - \frac{T_d}{2} - e\right) = \frac{T_d}{2} + 2e \quad (2-2)$$

仔细观察不难发现:联系工序基准 G 与定位基准 D 的尺寸是内孔与外圆的同轴度和外圆的半径,它们的公差和为 $\frac{T_d}{2} + 2e$ 。所以计算基准不重合误差的步骤为:①找出所求工序位置尺寸的工序基准 G ;②找出所求工序位置尺寸的定位基准;③用工艺尺寸链求出 G 、 D 之间的距离公差 T_{GD} ;④将 T_{GD} 投影在工序尺寸方向上。

2) 基准位置误差 Δ_y 的计算

计算基准位移误差的一般步骤如下:

(1) 分析定位副在允许的制造误差范围内,工件定位基准相对于夹具定位面可能发生位移的各个极限位置,作出极限位置图。

(2) 根据已知几何关系等求出定位基准在工序位置尺寸方向的最大变动范围,即 Δ_y 。 Δ_y 的分析计算与工件的具体定位副形式有关,将在以下典型表面定位的误差计算中分别说明。

1. 用几何方法计算定位误差

1) 工件以平面定位

定位基准面为平面时,其定位误差主要是由基准不重合误差 Δ_B 引起的。工件以平面定位时,基准位置误差 Δ_y 只是表面的不平整误差。若定位基准为粗基准,此时工件一般处于粗加工阶段,由定位基准位置误差造成的加工误差与后续加工余量相比可以忽略不计;若定位基准为精基准,其基准位置误差主要由平面度误差引起,但误差很小,故可以忽略。

如图 2-26 所示定位方案为铣工件上的台阶面,要求保持尺寸为 20 ± 0.15 。试分析和计算这时的定位误差,并判断这一方案是否可行。

由于这时工件是以 B 面为定位基准,而欲保持的加工尺寸 20 ± 0.15 的设计基准为 A 面,必然存在基准不重合误差 Δ_B 。定位误差的大小由定位尺寸的公差确定,在此例中,定位尺寸 $L_d = 40 \pm 0.14$,其公差值为 $T_{L_d} = 0.28 \text{ mm}$ 。此值也是定位误差 Δ_D 的值。因为平面定位时不考虑定位副的制造误差,所以有:

$$\Delta_D = \Delta_B = T_{L_d} = 0.28 \text{ mm}$$

本工序要保持在加工尺寸 $K = 20 \pm 0.15$,其允许的公差值为 $T_K = 0.30 \text{ mm}$,则有:

$$T_K - \Delta_D = 0.30 - 0.28 = 0.02 \text{ mm}$$

从以上计算中,可以看出, Δ_D 在加工误差中所占的比重太大,以至留给其他加工工序的允许公差仅为 0.02 mm ,由于此值太小,在实际加工过程中极易造成超差而产生废品。通过对此定位方案的定位误差的分析和计算,可以判断这一方案不宜采用,最好改为基准重合的定位方案。

2) 工件以外圆定位

工件以外圆表面定位的方式有定心定位和支承定位两种,常用的定位元件为各种定位套、

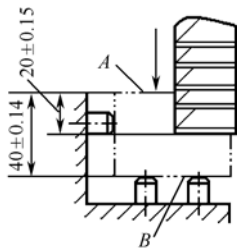


图 2-26 铣台阶面的定位方案

支承板和 V 形块。采用各种定位套或支承板定位时,定位误差的分析计算与前述圆孔定位和平面定位类似,现着重分析外圆表面在 V 形块上的定位。

如图 2-27 (a) 所示,在一轴类工件上铣一键槽,要求键槽与外圆中心线对称并保证工序尺寸为 H_1 、 H_2 或 H_3 ,分析计算采用 V 形块定位时各工序尺寸的定位误差。工件以其外圆在一支承板上定位,由于工件外圆上的侧母线与支承板接触,故属于支承定位,此时定位基准即为工件外圆的侧母线。而工件以其外圆在 V 形块上定位,虽工件与 V 形块(相当于两个成 α 角的支承板)接触也是工件外圆上的侧母线,但由于定位是两个侧母线同时接触,故从定位作用来看可以认为属于对中定心定位,此时定位基准为工件外圆的中心线。当 V 形块和工件外圆均制造得非常精确时,则被定位的工件外圆中心是确定的,并与 V 形块所确定的理想中心位置重合。但是,实际上对一批工件来说,其外圆尺寸有制造误差,此项误差将引起工件外圆中心在 V 形块的对称中心面上相对理想中心位置的偏移,从而造成有关工序尺寸的定位误差。

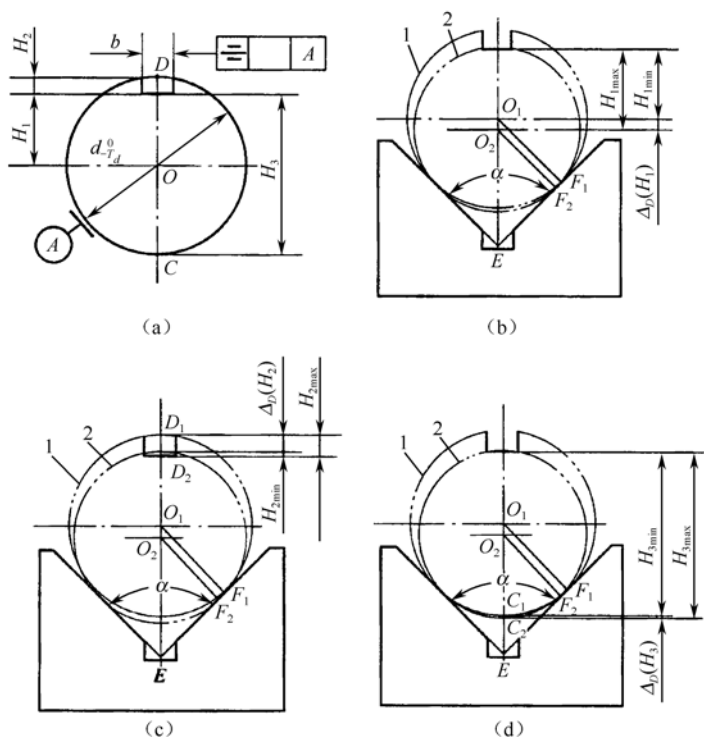


图 2-27 轴类零件铣键槽工序简图及定位误差分析

工序尺寸 H_1 的定位误差分析如图 2-27 (b) 所示,图中 1、2 为一批工件在 V 形块上定位的两种极端位置。根据图示的几何关系可知:

$$\Delta_D(H_1) = O_1O_2 = H_{1\max} - H_{1\min} = O_1E - O_2E = \frac{O_1F_1 - O_2F_2}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$\text{式中, } O_1F_1 - O_2F_2 = \frac{d}{2} - \frac{d - T_d}{2} = \frac{T_d}{2}。$$

此外,按定位误差计算公式也可以求出工序尺寸 H_1 的定位误差。对于工序尺寸 H_1 ,其工序基准为工件外圆中心 O ,在 V 形块上定位属于定心定位,其定位基准也是工件外圆中心 O ,

故属于工序基准与定位基准重合, 即 $\Delta_B(O) = 0$ 。

$$\Delta_D(H_1) = \Delta_y(O) \pm \Delta_B(O) = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \pm 0 = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

工序尺寸 H_2 的定位误差分析如图 2-27 (c) 所示, 图中 1、2 为一批工件在 V 形块上定位的两种极端位置。根据图示的几何关系可知:

$$\Delta_D(H_2) = D_1 D_2 = H_{2\max} - H_{2\min} = O_2 D_1 - O_2 D_2 = (O_1 O_2 + O_1 D_1) - O_2 D_2$$

$$\text{式中, } O_1 O_2 = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}; \quad O_1 D_1 = \frac{d}{2}; \quad O_2 D_2 = \frac{d - T_d}{2}。$$

$$\text{则} \quad \Delta_D(H_2) = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{T_d}{2} = \frac{T_d}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right)$$

按定位误差计算公式, 工序尺寸 H_2 的工序基准 D 与定位基准 O 不重合, 基准不重合误差为 $\Delta_B(D) = \frac{d}{2} - \frac{d - T_d}{2} = \frac{T_d}{2}$ 。当一批工件的定位由极端位置 1 到极端位置 2, 定位基准 O 的位置变动由上向下, 而工序基准相对定位基准理想位置的变动也是由上向下, 故在计算公式中取“+”号, 即

$$\Delta_D(H_2) = \Delta_y(O) + \Delta_B(D) = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{T_d}{2} = \frac{T_d}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right)$$

工序尺寸 H_3 的定位误差分析如图 2-27 (d) 所示, 图中 1、2 为一批工件在 V 形块上定位的两种极端位置。根据图示的几何关系可知:

$$\Delta_D(H_3) = C_1 C_2 = H_{3\max} - H_{3\min} = O_1 C_2 - O_1 C_1 = (O_1 O_2 + O_2 C_2) - O_1 C_1$$

$$\text{式中, } O_1 O_2 = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}; \quad O_2 C_2 = \frac{d - T_d}{2}; \quad O_1 C_1 = \frac{d}{2}。$$

$$\text{故} \quad \Delta_D(H_3) = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{T_d}{2} = \frac{T_d}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right)$$

按定位误差计算公式, 工序尺寸 H_3 的工序基准 C 与定位基准 O 不重合, 基准不重合误差 $\Delta_B(C) = \frac{d}{2} - \frac{d - T_d}{2} = \frac{T_d}{2}$ 。当一批工件的定位由极端位置 1 到极端位置 2, 定位基准 O 的位置变动由上向下, 而工序基准相对定位基准理想位置的变动则由下向上, 故在计算公式中取“-”号, 即

$$\Delta_D(H_3) = \Delta_y(O) - \Delta_B(C) = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{T_d}{2} = \frac{T_d}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right)$$

3) 以内孔在圆柱心轴上定位时的定位误差

在机械加工中, 有很多工件是以多个表面作为定位基准, 以实现表面组合定位的。例如, 套类、盘类或连杆类工件以平面和内孔表面组合定位, 箱体类工件以三个相互垂直的平面或一面两孔组合定位, 以及阶梯轴类工件以两个外圆表面组合等。

(1) 内孔与端面组合定位。根据选取主要定位基准的不同, 将产生不同形式的基准位置误差。

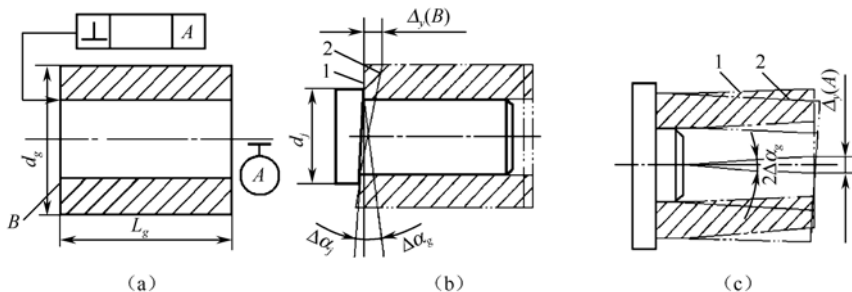


图 2-28 内孔与端面组合时的基准位置误差和角度误差

如图 2-28 (a) 所示的套类工件, 根据工序加工要求可采用内孔为第一定位基准, 也可采用端面为第一定位基准。如图 2-28 (b) 所示, 采用工件内孔为第一定位基准在长心轴或长定位销上定位, 内孔中心线 A 的位置误差可按前内孔表面定位误差的分析确定, 而第二定位基准——端面 B 将因其对内孔中心线的垂直度误差而引起基准的位置误差 $\Delta_y(B)$ 及角度误差 $\Delta_{\text{角度}}(B)$, 其值为

$$\Delta_y(B) = d_g \tan(\Delta\alpha_g) + d_j \tan(\Delta\alpha_j)$$

$$\Delta_{\text{角度}}(B) = \pm\Delta\alpha_g$$

式中, d_g 为工件外圆直径; d_j 为心轴台肩直径; $\Delta\alpha_g$ 、 $\Delta\alpha_j$ 分别为工件内孔与端面和心轴轴肩面与心轴轴线的角度误差。

如图 2-28 (c) 所示, 采用工件端面为第一定位基准在短心轴或短定位销上定位, 作为第一定位基准的端面没有基准位置误差 (即 $\Delta_y(B) = 0$), 而第二定位基准——内孔中心线 A 将因其对端面的垂直度误差而引起基准的位置误差 $\Delta_y(A)$ 及角度误差 $\Delta_{\text{角度}}(A)$, 其值为

$$\Delta_y(A) = 2L_g \tan(\Delta\alpha_g)$$

$$\Delta_{\text{角度}}(A) = \pm\Delta\alpha_g$$

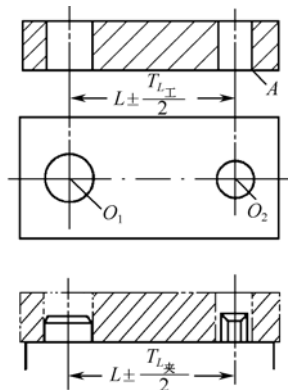


图 2-29 一面两销定位

(2) 一面二孔组合定位。根据工序加工要求可采用平面为第一定位基准, 也可采用其中某一个内孔为第一定位基准。图 2-29 所示为一长方体工件及其在一面两销上的定位情况, 因为采用短定位销, 故工件底面 A 为第一定位基准, 工件上的内孔 O_1 及 O_2 分别为第二和第三定位基准。工件在夹具中定位, 工件上作为第一定位基准的底面 A 没有基准位置误差。定位孔较浅, 其内孔中心线由于内孔与底面垂直度误差而引起的位置误差也可忽略不计。但作为第二、第三定位基准的 O_1 、 O_2 由于与定位销的配合间隙及两孔、两销中心距误差引起的基准位置误差必须考虑。

如图 2-30 (a) 所示, 当工件内孔 O_1 的直径尺寸最大、圆柱定位销直径尺寸最小, 且考虑工件上两孔中心距的制造误差, 根据图示的

两种极端位置可知:

$$\Delta_y(O_1) = O'_1O''_1 = T_{D_1} + T_{d_1} + X_{1\min}$$

因为销削边, 所以在横向的定位基准是 O_1 , O_2 处的定位误差为

$$\Delta_D(O_2) = O'_2O''_2 = O'_1O''_1 + T_{L_1} = T_{D_1} + T_{d_1} + X_{1\min} + T_{L_1}$$

式中, T_{D_1} 为工件内孔的公差; T_{d_1} 为夹具上短圆柱定位销的公差; $X_{1\min}$ 为工件内孔与定位销的最小配合间隙; T_{L_1} 为工件上两定位孔中心距公差。

如图 2-30 (b) 所示, 当工件内孔 O_2 的直径尺寸最大、菱形定位销的直径尺寸最小, 且工件上两孔及夹具上两定位销中心距均为 L , 根据图示的两种极端位置可求得两孔中心连线 O_1O_2 的角度误差, 即

$$\Delta_{\text{角度}}(O_1O_2) = \pm \arctan \frac{\Delta_y(O_1) + \Delta'_y(O_2)}{2L}$$

$$\Delta'_y(O_1) = \Delta_y(O_1) \quad (\text{纵向上})$$

$$\Delta'_y(O_2)_{(O_2)} = T_{D_2} + T_{d_2} + X_{2\min} \quad (\text{纵向上})$$

式中, T_{D_2} 为工件内孔 O_2 的公差; T_{d_2} 为夹具上菱形定位销的公差; $X_{2\min}$ 为工件内孔 O_2 与菱形定位销的最小配合间隙。

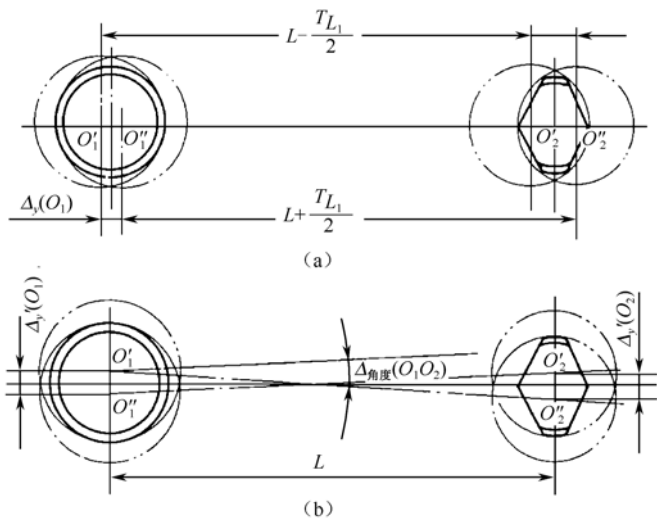


图 2-30 一面两孔定位的定位误差计算

对以外圆和平面以及外圆、内孔和平面组合定位的工件, 其各定位基准的位置误差和角误差的分析与上述一孔两面和一面两孔组合定位类似, 可参考上述有关公式进行计算。

(3) 外圆与外圆组合定位。图 2-31 所示为阶梯轴以两个外圆表面 d_1 和 d_2 为定位基准, 放置在两个不等高的窄 V 形块及支承钉上实现组合定位的情况。现分析计算在轴颈上铣半圆键及端面上钻孔时工序尺寸的定位误差。

① 在阶梯轴轴颈 d_2 上铣半圆键的工序尺寸 H 。工序尺寸 H 的工序基准为轴颈 d_2 的下母线 A , 定位基准为阶梯轴两轴颈 d_1 、 d_2 中心连线 O_1O_2 , 属于基准不重合情况。由于两轴颈有尺寸公差 T_{d_1} 及 T_{d_2} , 故定位基准 O_1O_2 对一批工件的定位来说, 也将产生位置变动, 即产生基准位置误差 $\Delta_y(O_1O_2)$ 。当两个轴颈均为最大尺寸和均为最小尺寸时, 定位基准 O_1O_2 处于两个极端位置 $O'_1O'_2$ 及 $O''_1O''_2$ 。从图中所示的几何关系可求得工序尺寸 H 的定位误差为

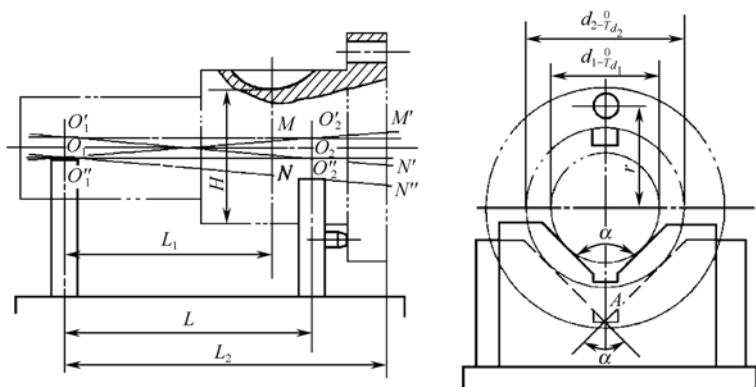


图 2-31 外圆柱面组合定位时的误差分析

$$\Delta_D(H) = \Delta_y(O_1O_2) - \Delta_B(A) = MN - \frac{T_{d_2}}{2} \quad (2-3)$$

$$MN = O_1'O_1'' + \frac{L_1}{L}(O_2'O_2'' - O_1'O_1'') \quad (2-4)$$

$$\text{式中, } O_1'O_1'' = \frac{T_{d_1}}{2\sin\frac{\alpha}{2}}; \quad O_2'O_2'' = \frac{T_{d_2}}{2\sin\frac{\alpha}{2}}$$

$$\text{所以} \quad \Delta_D(H) = \frac{T_{d_1}}{2\sin\frac{\alpha}{2}} + \frac{L_1}{L} \left(\frac{T_{d_2}}{2\sin\frac{\alpha}{2}} - \frac{T_{d_1}}{2\sin\frac{\alpha}{2}} \right) - \frac{T_{d_2}}{2}$$

② 在阶梯轴端面上钻孔的工序尺寸 r 。工序尺寸 r 的工序基准为阶梯轴两轴颈中心连线 O_1O_2 ，定位基准也是 O_1O_2 ，无基准不重合误差，即 $\Delta_b(O_1O_2) = 0$ 。同铣半圆键一样，定位基准仍有基准位置误差。当两个轴颈一个为最大尺寸、另一个为最小尺寸，以及一个为最小尺寸、另一个为最大尺寸时，其定位基准 O_1O_2 的两种极端位置为 $O_1'O_2'$ 及 $O_1'O_2''$ 。从图中所示的几何关系可求得工序尺寸 r 的定位误差为

$$\Delta_D(r) = \Delta'_y(O_1O_2) \pm \Delta_B(O_1O_2) = \Delta'_y(O_1O_2) \pm 0 = M'N'$$

$$\text{式中, } M'N' = M'N'' - N'N'' = \frac{L_2}{L}(O_1'O_1'' + O_2'O_2'') - O_1'O_1''。$$

$$\text{所以} \quad \Delta_D(r) = \frac{L_2}{L} \left(\frac{T_{d_2}}{2\sin\frac{\alpha}{2}} + \frac{T_{d_1}}{2\sin\frac{\alpha}{2}} \right) - \frac{T_{d_1}}{2\sin\frac{\alpha}{2}}$$

由上面阶梯轴加工时的定位误差分析可知，为求得可能出现的定位误差的最大值，对一批工件定位可能出现的两个极端位置的选取，将随工序尺寸所在部位的不同而不同。对于工序尺寸 H ，因为处于两个 V 形块之间，取 $O_1'O_2'$ 及 $O_1'O_2''$ 两个极端位置；而对于工序尺寸 r ，因为处于两个 V 形块之外，则应取 $O_1'O_2''$ 及 $O_1'O_2'$ 两个极端位置。

2. 用微分方法计算定位误差

如前所述,定位误差实质上就是工序基准在加工尺寸方向上的最大变动量。这个变动量相对于基本尺寸而言是个微量,可视为某个基本尺寸的微分。找出以工序基准为端点的在加工尺寸方向上的某个基本尺寸,对其进行微分,就可以得到定位误差。如图 2-32 所示,工件在 V 形块上定位铣键槽,以计算其定位误差为例进行说明。

工件在 V 形块上定位铣键槽时,与夹具有关的两项工序尺寸和工序要求如下:

- (1) 槽底至工件外圆中心的距离 H (如图 2-32 (a) 所示),或槽底至工件外圆下母线的距离 H_1 (如图 2-32 (b) 所示),或槽底至工件外圆上母线的距离 H_2 (如图 2-32 (c) 所示);
- (2) 键槽两侧面对外圆中心的对称度。

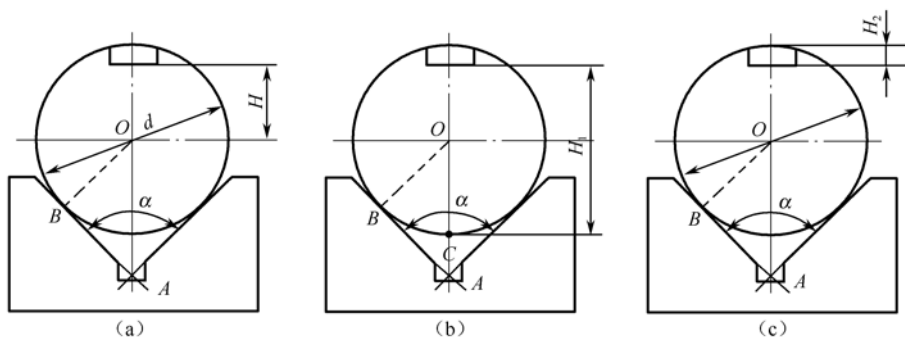


图 2-32 V 形块定位误差计算

对于第二项要求,若忽略工件的圆度误差和 V 形块的角度误差,可以认为工序基准(工件外圆中心)在水平方向上的位置变动量为零,即使用 V 形块对外圆表面定位时,在垂直于 V 形块对称面方向上的定位误差为零。下面计算第一项要求的定位误差。

首先考虑第一种情况(工序基准为圆心 O ,如图 2-32 (a) 所示),可以写出 O 点至加工尺寸方向上某一固定点(如 V 形块两斜面交点 A)的距离为

$$\overline{OA} = \frac{\overline{OB}}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

式中, d 为工件外圆直径; α 为 V 形块两斜面夹角。

对上式求全微分,得到:

$$d(\overline{OA}) = \frac{1}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} d(d) - \frac{d \cos \frac{\alpha}{2}}{4 \sin^2(\frac{\alpha}{2})} d(\alpha)$$

用微小增量代替微分,并将尺寸(包括直线尺寸和角度尺寸)误差视为微小增量,且考虑到尺寸误差可正可负,各项误差取绝对值,得到工序尺寸 H 的定位误差为

$$\Delta_{DW} = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{d \cos \frac{\alpha}{2}}{4 \sin^2(\frac{\alpha}{2})} T_\alpha \quad (2-5)$$

式中, T_d 和 T_α 分别为工件外圆直径公差和 V 形块的角度公差。若忽略 V 形块的角度公差 (实际上, 在支承定位的情况下, 定位元件的误差——此处为 V 形块的角度误差——可以通过调整刀具相对于夹具的位置来进行补偿), 得到 V 形块对外圆表面定位, 当工序基准为外圆中心时, 在垂直方向 (图 2-32 中尺寸 H 方向) 上的定位误差为

$$\Delta_{DW} = \frac{T_d}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

若工件的工序基准为外圆表面的下母线 C (相应的工序尺寸为 H_1 , 如图 2-32 (b) 所示), 则可用相同的方法求出其定位误差。此时 C 点至 A 的距离为

$$\overline{CA} = \overline{OA} - \overline{OC} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right)$$

取全微分, 并忽略 V 形块的角度公差, 可得到 V 形块对外圆表面定位, 当工序基准为外圆表面下母线时 (对应工序尺寸 H_1) 的定位误差为

$$\Delta_{DW} = \frac{T_d}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right)$$

用完全相同的方法还可以求出当工序基准为外圆表面母线时 (对应工序尺寸 H_2) 的定位误差为

$$\Delta_{DW} = \frac{T_d}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right)$$

使用微分方法计算定位误差, 在某些情况下要比几何方法简明。

再次强调指出: 定位误差一般总是针对成批生产, 并采用调整法加工的情况。在单件生产时, 若采用调整法加工 (如采用样件或对刀规对刀), 或在数控机床上加工时, 同样存在定位误差问题。但若采用试切法加工, 一般不考虑定位误差。

2.4 工件的夹紧及夹紧装置

2.3 节主要研究了工件在夹具中的定位问题, 目的在于解决工件的定位方法和保证必要的定位精度。但是, 即使将工件的定位问题解决得再好, 那也只是完成了工件装夹的一半; 只有在夹具上设置夹紧装置对工件实施夹紧, 这样才是完成了工件在夹具中装夹的全部任务。本节着重介绍有关夹紧装置的设计和计算方面的基本问题。

2.4.1 夹紧装置的组成和基本要求

工件在机床上或夹具中定位后,还需采用一定的机构将其夹紧,以保证工件在加工过程中不会受外力作用而产生位移或振动,这种夹紧工件的机构称为夹紧装置。

1. 夹紧装置的组成

夹具中的夹紧装置一般由下面三个部分组成。

1) 动力源

动力源是产生原始作用力的部分。例如,用人力对工件进行夹紧,称为手动夹紧;采用气动、液动、真空、电动以及机床的运动等动力装置来代替人力进行夹紧,称为机动夹紧。高效率的机床夹具多采用机动夹紧方式。

2) 中间递力机构

中间递力机构是接受和传递原始作用力,使其变为夹紧力并传递给夹紧元件的部分。根据动力源的不同和工件夹紧的实际需要,一般中间递力机构在传递力的过程中可以改变原始作用力的方向和大小,还具有一定的自锁性能,以保证夹紧的可靠性,这方面对手动夹紧尤为重要。

3) 夹紧元件

夹紧元件是夹紧装置的最终执行元件,通过它与工件受压面的接触,最终完成夹紧任务。在一些简单的手动夹紧装置中,夹紧元件和中间递力机构往往连在一起,很难区分。

实际上,根据工件的定位方法、加工要求和生产规模,夹紧装置的具体组成并不是一成不变的。在某些场合下,工件可不予夹紧而直接加工。例如,在重型工件上钻小孔,由于工件自身的重量足以克服钻削力和钻削力矩,所以不必夹紧工件;在倒角、镗小孔平面、去毛刺等工序中,由于加工面很小,加工时产生的切削力和切削力矩不大,这时往往在工件侧面设置一个或两个防转销,便可防止工件转动,甚至用手握住工件也能进行加工,所以无须设置夹紧装置。

2. 夹紧装置的基本要求

夹紧装置的设计和选用是否正确合理,对于保证加工精度、提高生产效率、减轻工人劳动强度有很大影响。为此,对夹紧装置设计提出如下基本要求:

- (1) 夹紧力应有有助于定位,而不应破坏定位。
 - (2) 夹紧力的大小应可靠和适当。加工过程中,既能保证工件不发生位置变动和振动,又不允许工件产生过大的夹紧变形和表面损伤。
 - (3) 应有足够的夹紧行程。
 - (4) 手动夹紧机构要有自锁性能。
 - (5) 结构简单紧凑、动作灵活、操作方便、安全省力,并有足够的强度和刚度。
- 为满足上述要求,其核心问题是正确地确定夹紧力。

2.4.2 设计夹紧装置的基本准则

一套夹紧装置设计的优劣,在很大程度上取决于夹紧力的设计是否合理。夹紧力包括大小、方向和作用点三个要素,它们的确定是夹紧机构设计中首先要解决的问题。

1. 夹紧力的方向的选择

夹紧力方向的选择一般遵循以下原则：

(1) 夹紧力的方向应垂直于主要定位基准面，以保证定位的稳定可靠。当工件用几个表面定位时，在各相应方向都应施加一定的夹紧力。一般来说，工件的主要定位基准面的面积较大、精度较高，限制的自由度多，夹紧力垂直作用于此面上，有利于保证工件的准确定位。

如图 2-33 (a) 所示，在角形支座工件上镗一个与 A 面有垂直度要求的孔，根据基准重合的原则，主要定位基准应选择 A 面，所以夹紧力应垂直于 A 面。只有这样， A 、 B 面之间的垂直度误差才不会影响工序孔的加工要求。若要求所镗之孔平行于 B 面，则应以 B 面为定位基准面，于是夹紧力的方向应垂直于 B 面，如图 2-33 (b) 所示。

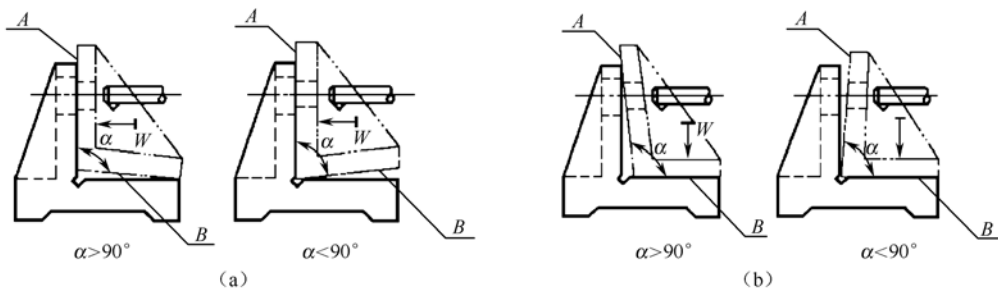


图 2-33 夹紧力方向的确定

若需要对几个支承面同时施加夹紧力，可分别加力，如图 2-34 (a) 所示；或采用一定形状的压块，实现一力多用，使各定位基准同时受到夹紧，如图 2-34(b)所示。

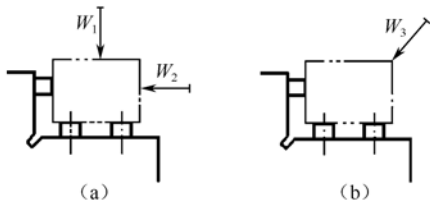


图 2-34 分别加力和一力两用

- (2) 夹紧力的方向应尽量与工件刚度最大的方向相一致，以减小工件变形。
- (3) 夹紧力的方向应尽可能与切削力、工件重力方向一致，有利于减小夹紧力。

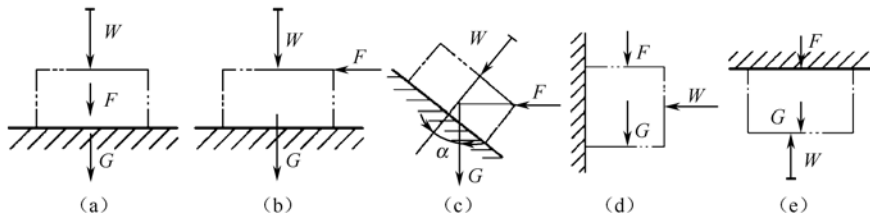


图 2-35 重力、切削力和夹紧力的关系

图 2-35 所示为工件装夹时夹紧力 W 、重力 G 、切削力三者之间关系的几种典型情况。从装夹方便及减少夹紧力的角度考虑，应使定位支承面处于水平向上位置。从图中三种力作用方向可见，当夹紧力与切削力及重力同方向时，图 2-35 (a) 需要的夹紧力最小，而以图 2-35 (d) 所示的夹紧力与切削力及重力垂直时，所需的夹紧力最大。

2. 夹紧力的作用点的选择

夹紧力的作用点是指夹紧元件与工件相接触的位置。选择夹紧力作用点的位置和数目时应注意以下几点。

1) 保证工件定位稳定, 不致引起工件产生位移或偏转

如图 2-36 (a) 所示, 夹紧力虽垂直于主要定位基准面, 但作用点却不正对定位元件, 产生了使工件偏转的力矩, 破坏了工件的定位; 夹紧力作用点正确位置应在如图 2-36 (b) 所示的稳定区域内。

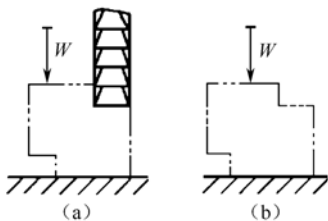


图 2-36 夹紧力的作用点对稳定的影响

2) 使被夹紧工件的夹紧变形尽可能小

设计夹具时, 为尽量减少工件的夹紧变形, 可采用增大工件受力面积和合理布置夹紧点位置等措施。如图 2-37 所示为利用带弧面的卡爪防止薄壁套筒的受力变形; 还可以在压板上增加垫圈, 使夹紧力均匀地作用在薄壁上, 减少工件的压陷变形。

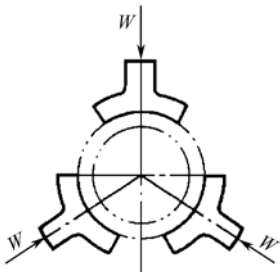
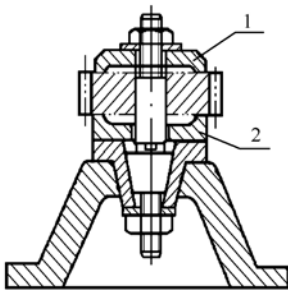


图 2-37 增大受力面积减少夹紧变形



1—压板; 2—垫板

图 2-38 夹紧力作用点靠近加工表面

3) 应尽量靠近切削部位, 以提高夹紧的可靠性

若切削部位刚性不足, 可采用辅助支承。如图 2-38 所示为滚齿时齿坯的装夹简图, 若压板 1 及垫板 2 的直径过小, 则夹紧力离切削部位较远, 从而降低工件夹紧的可靠性, 滚切时易产生振动。为提高工件夹紧的可靠性和工件加工部位的刚度, 也可在靠近工件加工部位另加一辅助支承和相应的夹紧点。

3. 夹紧力大小的估算

夹紧力的大小直接影响夹具使用的安全可靠。若夹紧力过小, 工件在夹具中的定位可能在加工过程中被破坏, 这样不仅影响工件的加工质量, 甚至可能造成事故。若夹紧力过大, 会使工件和夹具产生过大的夹紧变形, 影响加工精度。

在手动夹紧时,可凭人力控制夹紧力的大小,一般可用类比方法参考同类的夹紧机构予以确定。

当设计机动夹紧装置时,则需要用分析的方法估算夹紧力的大小,以便确定动力部件的有关参数。在实际应用中,动力部件尺寸通常参考经过考验的同类型动力部件,在相似条件下进行类比设计和选用。

为简化起见,通常将夹具和工件视为一个刚性系统来计算夹紧力。首先找出在加工过程中对夹紧最不利的瞬时状态,然后根据该状态下工件受切削力、夹紧力(大工件还应考虑重力,高速运动的工件还应考虑惯性力等),利用静力平衡条件计算出理论夹紧力 W_0 ,再乘以安全系数 K ,作为实际所需的夹紧力 W ,即

$$W=K \cdot W_0 \quad (2-6)$$

根据生产经验,一般取 $K=1.5 \sim 3$,粗加工取 $K=2.5 \sim 3$,精加工取 $K=1.5 \sim 2$ 。

夹紧工件所需夹紧力的大小,除与切削力的大小有关外,还与切削力对定位支承的作用方向有关。

以上对于夹紧力的计算是一种估算。如果是一些关键性的重要夹具,往往还要通过实验的方法来确定所需的夹紧力。

2.4.3 常见的夹紧装置

从夹紧装置的组成中可以看出,不论采用何种动力源(手动或机动),外加的原始作用力要转化为夹紧力,都必须通过夹紧机构。

夹紧机构的设计和选择是夹紧装置设计的主要内容。根据已设计好的定位方案和工件的结构形状以及夹具的总体布局情况,就可以着手确定夹紧机构的形式。常用的夹紧机构有斜楔、螺旋、圆偏心、铰链杠杆、对中定心和联动夹紧机构等。

1. 斜楔夹紧机构

斜楔是夹紧机构中最基本的形式,是利用斜面楔紧的原理来夹紧工件的。螺旋夹紧、圆偏心夹紧、对中定心夹紧等均是斜楔夹紧机构的变形。

如图 2-39 所示是利用楔块来夹紧工件的示意图。其工作原理是靠原始力 Q 使斜楔产生移动,从而产生夹紧力 W ,推动工件向上并将工件夹紧。

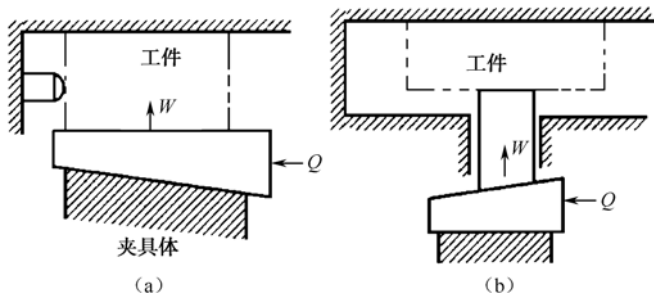


图 2-39 斜楔夹紧示意图

如图 2-40 所示,由静力学原理可得斜楔夹紧工件时的受力为

$$W = \frac{Q}{\tan(\alpha + \varphi_1) + \tan(\varphi_2)} = W_{\text{夹}} \quad (2-7)$$

式中, W 为斜楔产生的夹紧力 (N); Q 为原始力 (N); α 为楔块升角, 一般取 $6^\circ \sim 10^\circ$, 机动夹紧时取 $\alpha=15^\circ$ 、 30° ; φ_1 、 φ_2 为斜楔与夹具体之间、斜楔与工件间的摩擦角。一般取摩擦系数 $f=0.1 \sim 0.15$, 故 $\varphi_1, \varphi_2 \approx 5^\circ 40' \sim 8^\circ 30'$ 。

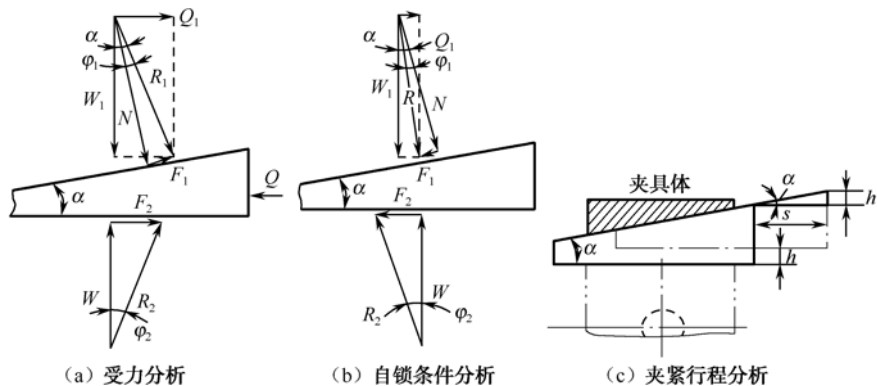


图 2-40 斜楔夹紧力分析

夹紧力 W 与原始力 Q 之比称为夹紧机构的增力比, 用 i_q 表示, 则

$$i_q = \frac{W}{Q} = \frac{1}{\tan(\alpha + \varphi_1) + \tan(\varphi_2)} \quad (2-8)$$

斜楔机构产生自锁时应满足的条件为

$$\varphi_1 + \varphi_2 \geq \alpha \quad (2-9)$$

当摩擦系数 f 取 $0.1 \sim 0.15$ 时, φ 为 $5^\circ 40' \sim 8^\circ 30'$, 此时 $\alpha \leq 12^\circ$, 一般情况下, 取 $\alpha=6^\circ$ 。

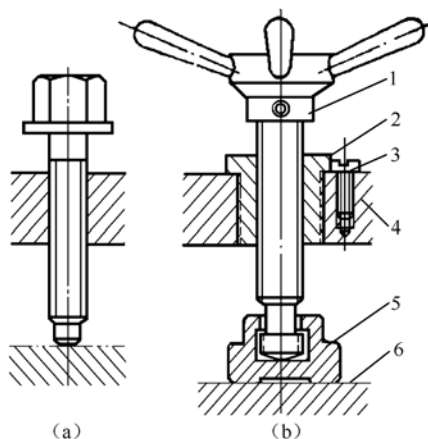
可见, 当原始作用力一定时, α 越小, 夹紧力越大, 自锁性越好, 夹紧行程 h 就越小。因此, 在选择楔角时, 应综合考虑自锁、增力、行程三方面的因素。当要求有较大的夹紧行程, 又要求夹紧机构能自锁时, 可将斜楔的斜面做成两段, 即前一段选用大升角, 后一段采用具有自锁条件的升角。

2. 螺旋夹紧机构

螺旋夹紧机构实质上是绕在圆柱体上的楔块, 原理与楔块相同。图 2-41 所示是典型的螺旋夹紧机构。图 2-41 (a) 所示是最简单的螺旋夹紧机构, 螺钉头部直接作用在工件表面上, 其缺点是旋紧时要用扳手, 且夹紧过程中容易损坏工件表面。为了克服图 2-41 (a) 中的不足, 生产中常用图 2-41 (b) 所示的结构, 在螺钉与工件之间加上了带浮动的压块。压块的作用主要是增大接触面积, 防止夹伤工件, 减少工件变形。

如图 2-42 所示, 通过力矩平衡方程求解夹紧力, 计算公式如下 (推导过程从略):

$$W = \frac{QL}{\frac{d_2}{2} \tan(\alpha + \varphi_1) + r' \tan(\varphi_2)} \quad (2-10)$$



1—手柄；2—螺母套筒；3—止动螺钉；4—夹具体；5—压块；6—工件

图 2-41 螺旋夹紧机构

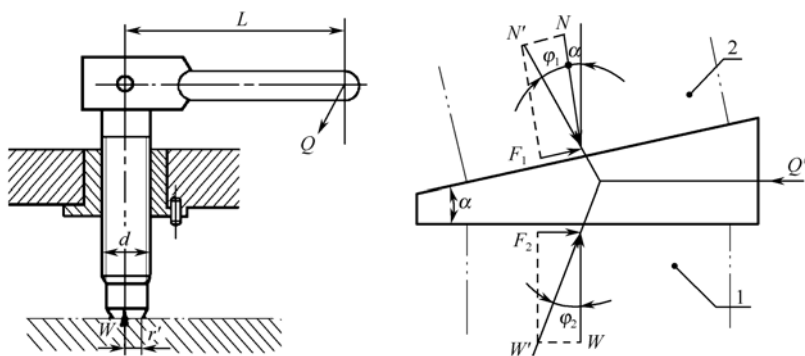


图 2-42 螺杆受力分析

式中, W 为夹紧力 (N); Q 是原始力 (N); φ_1 为螺母、螺杆间的当量摩擦角, 与螺纹牙型有关; φ_2 为螺杆端部与工件的当量摩擦角; α 为螺纹中径处的螺旋升角; d_2 为螺纹中径 (mm); r' 为螺杆端部与工件的当量摩擦半径 (mm), 当端部为球面时, $r'=0$ 。

与楔块夹紧一样, 螺旋夹紧的自锁条件为

$$\varphi_1 + \varphi_2 \geq \alpha \quad (2-11)$$

由于单头螺纹的螺旋升角很小, 一般只有 $2.5^\circ \sim 3.5^\circ$, 所以螺旋夹紧的自锁性很好。

由于螺旋夹紧机构具有结构简单、制造容易、夹紧可靠、扩力比大和夹紧行程不受限制等特点, 所以在手动夹紧装置中应用广泛。其缺点是夹紧动作慢、效率低。

3. 偏心夹紧机构

偏心夹紧机构也是楔块夹紧机构的一种转化形式。常见的偏心轮夹紧机构有两种: 圆偏心和曲线偏心。圆偏心是利用回转中心与几何中心偏心的偏心轮或偏心轴作为夹紧元件, 这些偏心轮的结构已经标准化了, 设计时可参阅有关资料。曲线偏心是采用阿基米德螺旋线或对数螺旋线作为轮廓曲线; 这种凸轮的特点是偏心升角变化均匀, 夹紧性能稳定, 但制造困难, 故很少使用。

图 2-43 (a) 中 O 是圆偏心轮的几何中心, R 是半径; O_1 是圆偏心轮的回转中心。 R_0 是最

小回转半径, $OO_1=e=R-R_0$ 为偏心距。当偏心轮绕 O_1 回转时, 圆周上各点到 O_1 的距离都在不断地变化, 图中阴影部分可以近似地看成一个绕在半径为 R_0 圆上的曲线楔块。这样, 在圆偏心轮回转时, 其回转半径不断增大, 相当于曲线楔块向前推进, 楔紧在半径为 R_0 的圆与工件之间, 因而把工件压紧, 其工作原理与楔块也相同。

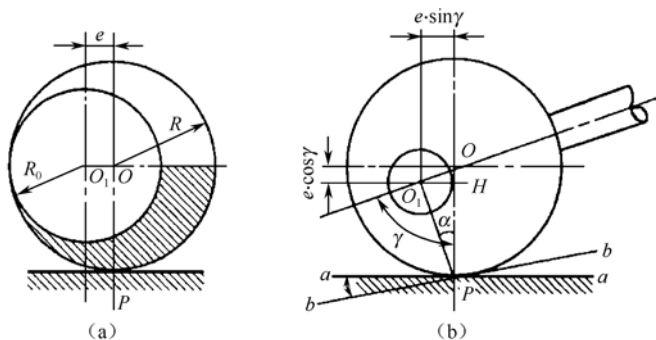


图 2-43 圆偏心夹紧机构工作原理

如图 2-43 (b) 所示, 圆偏心相当于一个斜边为曲线的斜楔, 工作时楔紧在工件和圆偏心的转轴之间, 所以其夹紧力、增力比可由相应的计算公式导出 (推导过程略):

$$W = \frac{QL}{e(\sin \gamma - f \cos \gamma) + f(R+r)} \quad (2-12)$$

式中, W 为夹紧力 (N); Q 为手柄上的原始作用力 (N); L 为力臂长 (mm); f 为摩擦系数; R 为偏心轴半径; r 为轴销半径; e 为偏心量; γ 为偏心轮几何中心与回转中心连线 O_1O_2 和几何中心与夹紧点连线 O_1P 之间的夹角, 此角是变化的, 所以夹紧力 W 也是变化的。

当 $\gamma \approx 90^\circ$ 时, α 接近最大值:

$$\alpha_{\max} \approx \arctan\left(\frac{e}{R}\right)$$

圆偏心轮的自锁与斜块自锁条件类同, 仍为

$$\varphi_1 + \varphi_2 \geq \alpha \quad (2-13)$$

故圆偏心轮的自锁条件为

$$\frac{e}{R} = \frac{2e}{D} \leq f \quad (2-14)$$

一般取 $f=0.10 \sim 0.15$, 则 $\frac{D}{e} \geq 14 \sim 20$, 通常把 $\frac{D}{e}$ 的比值称为偏心率或偏心参数, 它表示偏心轮工作的可靠程度。比值越大自锁性能越好, 但结构尺寸就越大, 一般取 $D=15 \times e$ 。

偏心夹紧机构的优点是结构简单、操作方便、动作迅速; 缺点是自锁性能较差、增力比较小, 一般用于切削负荷不大及无很大震动的场合。

对于斜楔、螺旋及偏心夹紧机构之间的分析、对比情况, 见表 2-2。

4. 定心、对中夹紧机构

定心、对中夹紧机构是使工件同时完成定位和夹紧的一种特殊的夹紧机构, 该夹具上与工件定位面相接触的元件, 既是定位元件又是夹紧元件。这种机构的定位夹紧元件能以相同的速

度，同时趋近或退离工件的定位基准，从而保证工件的定心、对中和对称性的要求，使定位基面的公差对称分布。此机构适用于加工表面有同轴度或对称性要求的工件，使定位基准和工序基准重合，保证工序的加工精度。

表 2-2 斜楔、螺旋及偏心夹紧机构对比

项 目	斜 楔	螺 旋	偏 心
运动特性	直线运动转为另一直线运动	回转运动转为直线运动	回转运动转为直线运动
增力比 i_q	很小 ($i_q=2\sim5$)	很大 ($i_q=65\sim175$)	较小 ($i_q=12\sim14$)
自锁性能	自锁条件: $\alpha<\varphi_1+\varphi_2$ α 越小, 自锁性能越好	单头螺纹都具有良好的自锁性能	结构不耐振, 自锁条件: $2e/D\leq f$, D/e 越大, 自锁性越好
机械效率	0.3~0.7	<0.5	0.3~0.4
结构情况	组合使用时结构庞大	结构非常简单	结构比较简单
动力源的选择	多采用气动、液压	多用于手动	多用于手动

在机械加工中，很多加工表面是以其中心线或对称面作为加工工序基准的，如加工与外圆同轴的内孔或加工与两侧面对称的通槽等工件。若这时采用定心、对中夹紧机构装夹加工，则可以使基准位置误差为零，确保该工序的加工精度。又如，在主轴箱体加工时，为保证主轴孔有均匀的余量，以主轴毛坯孔为定位基准进行第一道工序精基准面的加工所采用的定心夹紧心轴，也属于定心、对中夹紧机构。

如图 2-44 所示的工件要在中央铣一个键槽，其位置应保持对中。如果按图 2-44 (a) 所示的方法，用一个侧面定位，则由于工件存在公差 T_D ，这时其公差便集中到另一侧面，加工后，键槽的位置就不可能居中。如果采用图 2-44 (b) 所示的两个定位件同时趋近工件，将工件的公差在两侧均匀分布为 $\pm T_D/2$ ，则此时不管 T_D 多大，工件的中心位置总是保持不变的。

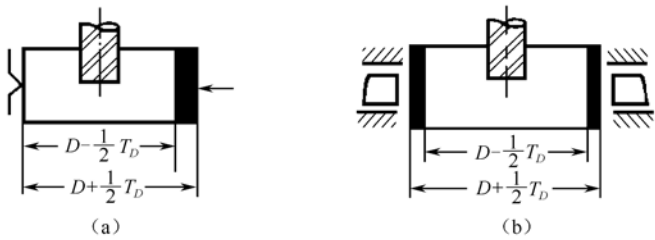


图 2-44 公差均分示意图

定心夹紧机构的主要特点是：定位和夹紧是同时进行的，机构将工件的公差均分，从而提高了加工精度。

此外，该机构的定位误差从理论上应该等于零，但实际上，由于机构的配合间隙、夹紧装置的制造误差、装配误差，以及使用当中的变形和磨损等因素的影响，定位误差总是存在的。例如，普通车床的三爪卡盘的定心夹紧机构精度，一般只能达到 0.05~0.1mm；精密的可达到 0.005~0.03 mm。因此，提高定心精度的唯一途径是提高机构的制造、装配精度。

定心、对中夹紧机构之所以能实现准确的定心、对中，就在于它们利用了定位夹紧元件的等速移动、转动或均匀弹性变形的的方式，来消除一批工件定位基准面的制造误差对定位基准位置的影响。就其各自实现定心和对中的工作原理而言，可分为下述两种。

(1) 等速移动定心夹紧机构：主要有楔式定心夹紧机构，螺旋传动定心夹紧机构，偏心传动定心夹紧机构和齿轮、齿条定心夹紧机构等。这些结构制造方便，但定心精度低。

(2) 均匀弹性变形定心夹紧机构：主要有弹簧夹头、可胀心轴、弹性膜片卡盘、弹性胀套、碟形簧片式定心夹具及液性塑料定心夹具等形式。

5. 联动夹紧机构

为了提高生产率，减少工件装、夹的辅助时间，常采用高效率的联动夹紧机构。该夹紧机构分为多点、多向联动夹紧机构和多件夹紧的联动夹紧机构。所谓多点、多向联动夹紧机构，是利用一个原始作用力，通过一定的机构，将力分散到数个不同方向的作用点上对工件进行夹紧。而多件夹紧机构则是利用一个原始力，通过一定的机构，对数个相同形状或不同形状的工件进行夹紧的联动夹紧机构。

图 2-45 所示的联动夹紧机构是四点双向浮动夹紧机构，是在相互垂直的两个方向上同时夹紧工件，两个方向上的夹紧力通过杠杆 L_1 、 L_2 的长度比来调整。

图 2-46 所示是利用浮动压块进行多件平行夹紧联动机构，多件平行夹紧是指将总夹紧力均匀地分配给每个工件，即总的夹紧力等于每个工件上夹紧力的总和。由于工件本身夹紧部位的尺寸有公差，为了保证同时夹紧每一个工件，所以这种机构中的夹紧元件之间必须做成浮动的，以便使夹紧力之间趋于平衡，来补偿工件的尺寸公差。

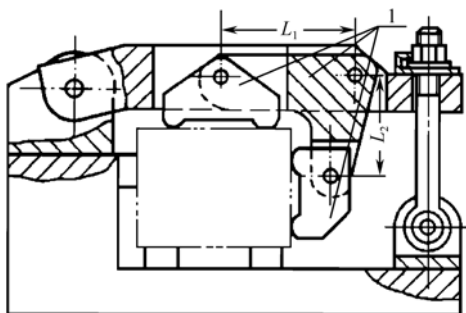


图 2-45 联动夹紧机构图

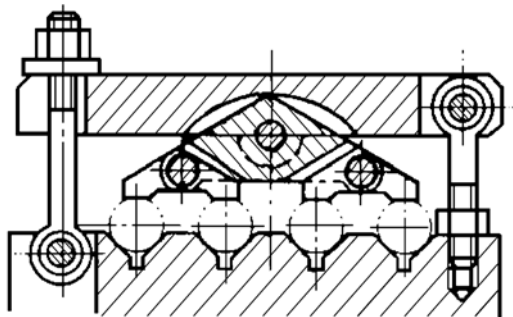


图 2-46 多件平行夹紧

图 2-47 所示的多件连续夹紧结构，是指夹紧力从一个方向依次由一个工件传给另一个工件。不考虑摩擦力时，则每一个工件上所受到的夹紧力就等于总夹紧力。考虑摩擦力时，每个工件上所受到的力就不相等了，而是依次递减，最后夹紧的工件受力最小。但由于摩擦损失和夹紧力相比是很小的，故可以忽略不计。

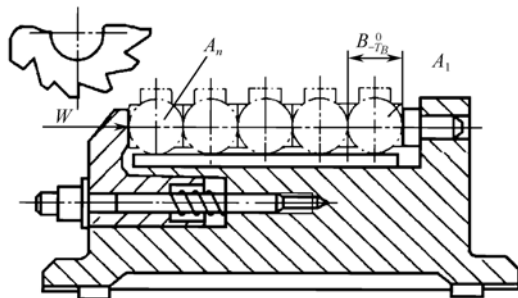


图 2-47 依次连续多件夹紧

多件依次连续夹紧机构，采用带半圆槽的压板来实现对工件定位和夹紧。此夹具结构比较简单，不需要采用浮动元件。

通过以上的分析可知，联动机构必须具有浮动环节，否则不能使所有夹紧点具有良好的接触。

6. 动力夹紧装置

随着加工过程自动化的日益增多，采用机动夹紧方式的夹具也越来越多。常见的动力夹紧装置的组成系统有气动夹紧装置、液压夹紧装置、气-液增压夹紧装置、电力夹紧装置、真空夹紧装置等。

2.5 机床夹具设计

2.5.1 机床夹具设计的基本要求

1. 能保证工件的加工要求

保证加工质量是首先必须满足的要求。保证加工质量的关键，就在于正确选定定位基准、定位方法和定位元件。必要时需进行定位误差的分析计算，也要注意夹具中其他影响加工质量的部件的结构。

2. 能提高生产效率，降低成本

应尽量采用各种快速高效的结构，缩短辅助时间，提高生产效率。同时尽可能采用标准元件与标准结构，力求结构简单、制造容易，以降低夹具制造成本。在大批大量生产中，为提高生产率，应采用先进的结构和机械传动装置；在小批生产中，则应尽量使夹具结构简单，以降低制造成本。

3. 操作方便、安全

在客观条件允许且又经济的前提下，尽可能采用气动、液压和气-液等机械化夹紧装置，以减轻操作者的劳动强度。操作位置应正确，符合操作工人的操作习惯，并注意操作安全。

4. 便于排屑

排屑问题是夹具设计中的一个重要问题。因为切屑积聚在夹具中，会破坏工件正确可靠地定位，切屑带来的大量热量会引起热变形，影响加工质量，而清扫切屑又要花费一部分辅助时间。切屑积聚严重时，还会损坏刀具或造成工伤事故。

5. 要有良好的工艺性

所设计的夹具应便于制造、检验、装配、调整、维修等。初学者由于缺乏实际经验，往往容易忽视这些问题，必须引起注意。

2.5.2 夹具设计的基本步骤

1. 收集并分析原始资料，明确设计任务

设计夹具时必要的原始资料包括：工件的有关技术文件、本工序所用机床的技术特性、夹具零部件的标准手册及有关结构图册等。

首先根据设计任务书，分析研究工件的工作图、毛坯图、有关部件的装配图，机械加工工艺规程等，明确工件的结构、材料、年产量及其在机器部件中的作用，深入了解本工序加工的技术要求、前后工序的联系、毛坯（或半成品）种类、加工余量和切削用量等。

为了使设计夹具的设计符合本厂实际情况，还要熟悉本工序所用的设备、辅助工具中与设计夹具有关的技术性能和规格、安装夹具部位的基本尺寸、所用刀具的有关参数、本厂工具车间的技术水平及库存材料情况等。

设计中还应充分利用各方面的成功经验，参考生产中行之有效的典型结构和先进夹具，参照夹具零部件设计标准，以使所设计的夹具具有实用性和先进性。

2. 拟定夹具结构方案，绘制结构草图

在充分做好上述准备工作的基础上，可按如下步骤拟定夹具的结构：

(1) 确定工件的定位方案，遵照定位基本原理确定工件的定位方式，并设计选用相应的定位元件；

(2) 研究确定工件的夹紧部位和夹紧方法，并设计可靠的夹紧装置；

(3) 确定刀具的对刀导引方案，设计选用对刀或导引元件；

(4) 确定其他元件或装置的结构形式，如定位键、分度装置等；

(5) 考虑各种元件和装置的布局，确定夹具体和夹具的总体结构。

设计过程中最好考虑几个不同方案，画出草图，经过工序精度和结构形式的综合分析比较和计算，同时也应进行粗略的经济分析，选取其中的最佳方案。

3. 绘制夹具装配图

在夹具结构方案草图讨论审定之后，即可进行夹具装配图的绘制。夹具装配图应有良好的直观性，应尽量选择面对操作者的方向为主视图。装配图的比例尽量选用1:1，必要时也可将比例放大或缩小。在完整表达夹具工作原理、整体结构和各种装置以及元件之间相互位置关系的前提下，装配图的视图数量要尽量少。

绘制夹具装配图的顺序为：①用双点画线绘出工件的轮廓外形和主要表面（定位面、夹紧面、待加工面），并用网线示出加工余量；②视工件为透明体，根据其形状和位置依次绘出定位、对刀导引、夹紧元件及其他元件或装置；③绘出夹具体，形成一个夹具整体。夹具装配图绘制后，还应画出零件明细表和标题栏，写明夹具名称及零件明细表所规定的内容。

4. 标注有关尺寸、配合和夹具的技术条件

在夹具装配图上应标注的尺寸及配合有下列五类。

(1) 保证工件定位精度的有关尺寸及公差：如工件以孔或外圆定位时，定位元件定位面的

直径尺寸及公差等。

(2) 夹具与刀具的联系尺寸：用于确定夹具上对刀导引元件位置的尺寸，如对刀块工作表面与定位元件的位置尺寸等。

(3) 夹具与机床的联系尺寸：用于确定夹具在机床上正确位置的尺寸，如夹具与机床主轴端的连接尺寸、定位键与机床 T 形槽的配合尺寸等。

(4) 夹具内部的配合尺寸：为保证夹具装配的使用性能，其自身零部件的装配关系应标注相应配合尺寸，如定位元件与夹具体的配合尺寸、夹紧装置中连接传动部件的配合尺寸等。

(5) 夹具的轮廓尺寸：用于检查夹具所占空间，通常标注其最大外廓，对于有可动部分的夹具，应标注可动部分处于最大极限位置时所占的尺寸，以便了解夹具使用中与机床、刀具等会不会发生碰撞。

夹具上对工件加工精度有直接影响的尺寸公差，一般可按工件上相应加工尺寸公差的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{2}$ 确定；工件上的尺寸和角度未注公差时，夹具上相应尺寸和角度的公差分别取 $\pm 0.1\text{mm}$ 和 $\pm 10'$ 。夹具内部尺寸的配合尺寸公差可根据其功用和装配要求按一般公差与配合原则决定。

夹具装配图上除标注有关尺寸和配合外，还应对有关零部件的相互位置精度提出要求。在夹具装配图上应标注的位置精度有以下几个方面：

- (1) 定位元件之间或定位元件与夹具体底面间的位置要求；
- (2) 定位元件与夹具定位元件（如定位键或找正基面）间的位置要求；
- (3) 对刀导引元件与夹具定位元件间的位置要求；
- (4) 定位元件与对刀导引元件之间的位置要求。

根据夹具类型的不同，所提出的具体技术条件大致包括以下各方面的内容。

对于钻（镗）床夹具：①定位元件工作表面对夹具底面的垂直度或平行度；②钻（镗）套轴线对定位元件工作表面的垂直度或平行度；③钻（镗）套轴线对夹具底座平面的垂直度或平行度；④同轴的双层钻套的同轴度；⑤钻（镗）套轴线之间以及轴线与元件之间的尺寸要求及相互位置要求。

对于铣（刨）床夹具：①定位元件工作表面（或轴线）对夹具底面的垂直度、平行度；②定位元件工作表面（或轴线）对定位键侧面的垂直度、平行度；③对刀面对定位元件工作表面的垂直度、平行度；④定位元件工作表面之间的垂直度、平行度。

对于车（磨）床夹具：①定位元件工作表面相对于夹具回转轴线（或找正基面）的跳动；②定位元件工作表面相对于夹具回转轴线的垂直度、平行度；③定位元件工作表面相对于夹具安装定位面的垂直度、平行度；④定位元件工作表面之间的垂直度、平行度。

在夹具装配图上，还应用文字标注说明夹具在制造和使用上的其他要求，如夹具的平衡和密封、装配性能和要求，以及使用中的注意事项等。

5. 绘制夹具零件图

夹具装配图中的非标准件都要绘制零件图。在确定夹具零件的尺寸、公差和技术要求时，要考虑满足夹具装配图中规定的精度要求。夹具的装配精度可由各有关零件相应尺寸精度保证，或采用装配时直接加工、修配等方法来保证。若采用后一种方法，在标注零件图中有关尺寸时，应标明对装配的要求。

2.6 典型夹具应用实例分析

2.6.1 车床夹具

车床夹具主要用于加工零件的内外圆柱面、圆锥面、回转成型面、螺纹及端平面等。

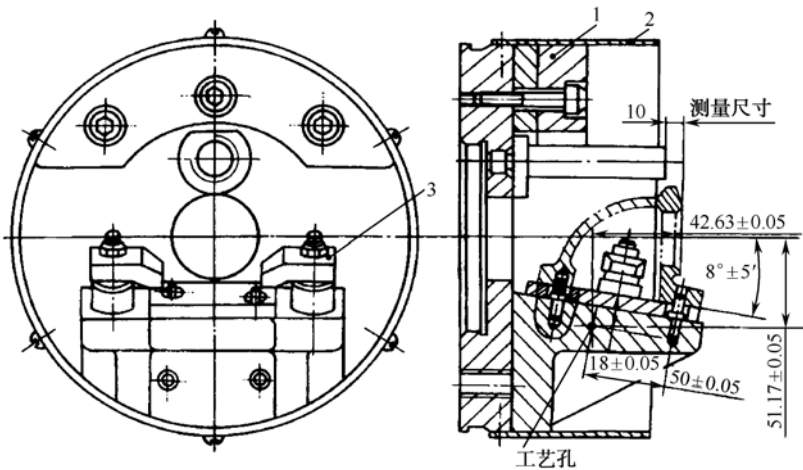
1. 车床夹具的类型与典型结构

根据工件的定位基准和夹具本身的结构特点，车床夹具可分为以下四类：

- (1) 以工件外圆表面定位的车床夹具，如各类夹盘和夹头。
- (2) 以工件内圆表面定位的车床夹具，如各种心轴。
- (3) 以工件顶尖孔定位的车床夹具，如顶尖、拨盘等。
- (4) 用于加工非回转体的车床夹具，如各种弯板式、花盘式车床夹具。

当工件定位表面为单一圆柱表面或与被加工表面相垂直的平面时，可采用各种通用车床夹具，如三爪自动定心卡盘、四爪单动卡盘、顶尖、花盘等。当工件定位面较复杂或有其他特殊要求时，应设计专用车床夹具。

如图 2-48 所示为一弯板式车床夹具，用于加工壳体零件的孔和端面。工件以底面和两孔定位，用两个钩形压板夹紧。加工孔轴线与底面之间的 8° 夹角由弯板的角度来保证。为了控制端面尺寸，夹具上设置了测量基准（圆柱棒端面），同时设置了一个供检验和校正夹具用的工艺孔。



1—平衡块；2—防护罩；3—钩形压板

图 2-48 弯板式车床夹具

2. 车床夹具设计要点

(1) 车床夹具总体结构。车床夹具大多安装在机床主轴上，并与主轴一起做回转运动。为保证夹具平稳，夹具结构应尽量紧凑，重心应尽量靠近主轴端。对于弯板式车床夹具和偏重的

车床夹具,应很好地进行平衡。通常可采用加平衡块(配重)的方法进行平衡(如图 2-48 中件 1)。为保证安全,夹具上所有元件或机构不应超出夹具体体的外廓,必要时应加防护罩(如图 2-48 中件 2)。此外,要求车床夹具的夹紧机构能提供足够的夹紧力,且有可靠的自锁性,以确保工件在切削过程中不会松动。

(2) 夹具与机床的连接。车床夹具与机床主轴的连接方式取决于机床主轴轴端的结构及夹具的体积和精度要求。图 2-49 所示为几种常见的连接方式。图 2-49 (a) 中的夹具体以长锥柄安装在主轴孔内,这种方式定位精度高,但刚性较差,多用于小型车床夹具与主轴的连接。图 2-49 (b) 所示夹具以端面 A 和圆孔 D 在主轴上定位,孔与主轴轴颈的配合一般取 $H7/h6$ 。这种连接方式制造容易,但定位精度不高。图 2-49 (c) 所示夹具以端面 T 和短锥面 K 定位,这种安装方式不但定心精度高,而且刚性好。需要注意的是,这种定位方式属于过定位,故要求制造精度很高,通常要对夹具体上的端面和孔进行配磨加工。

车床夹具还经常使用过渡盘与机床主轴连接。过渡盘与机床的连接与上面介绍的夹具体与主轴的连接方法相同,过渡盘与夹具的连接大都采用止口(一个大平面加一短圆柱面)连接方式。当车床上使用的夹具需要经常更换,或同一套夹具需要在不同机床上使用时,采用过渡盘连接是很方便的。为减小由于增加过渡盘而造成的夹具安装误差,可在安装夹具时,对夹具定位面(或在夹具上专门做出的找正环面)进行找正。

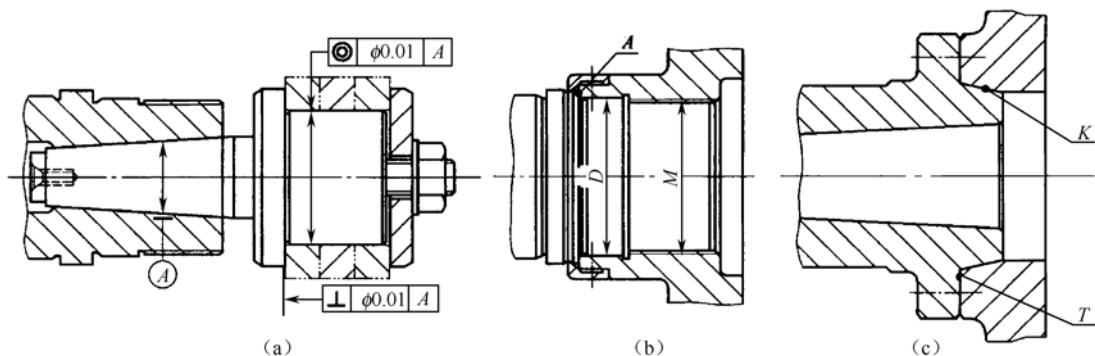


图 2-49 夹具在车床主轴上的安装

2.6.2 钻床夹具

钻床夹具因大都具有刀具导向装置,习惯上又称为钻模,主要用于孔加工。在机床夹具中,钻模占有很大的比例。

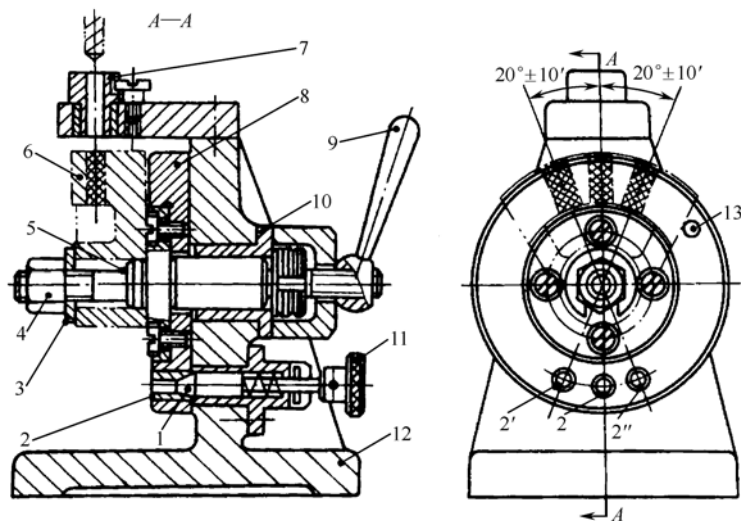
1. 钻模的类型与典型结构

钻模根据其结构特点可分为固定式钻模、回转式钻模、翻转式钻模、盖板式钻模和滑柱式钻模等。

固定式钻模在加工中相对于工件的位置保持不变。这类钻模多在立式钻床、摇臂钻床和多轴钻床上使用。

如图 2-50 所示为回转式钻模,用于加工扇形工件上三个有角度关系的径向孔。拧紧螺母 4,通过开口垫圈 3 将工件夹紧。转动手柄 9,可将分度盘 8 松开。此时用捏手 11 将定位销 1 从定位套 2 中拔出,使分度盘连同工件一起回转 20° ,将定位销 1 重新插入定位套 2' 或 2'' 中,

即实现了分度。再将手柄 9 转回，锁紧分度盘，即可进行加工。

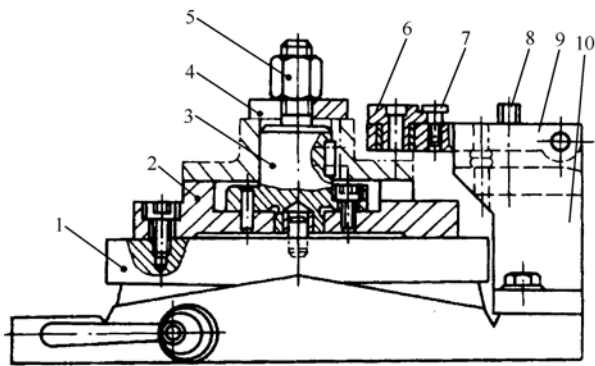


1—定位销；2—定位套；3—开口垫圈；4—螺母；5—定位销；

6—工件；7—钻套；8—分度盘；9—手柄；10—衬套；11—捏手；12—夹具体；13—挡销

图 2-50 回转式钻模

回转式钻模的结构特点是夹具具有分度装置，某些分度装置已标准化（如立轴或卧轴回转工作台），设计回转式钻模时可以充分利用这些装置。如图 2-51 所示是利用立轴式通用回转工作台构成回转式钻模的一个例子。此处立轴式回转工作台既是夹具的分度装置，也是夹具体。



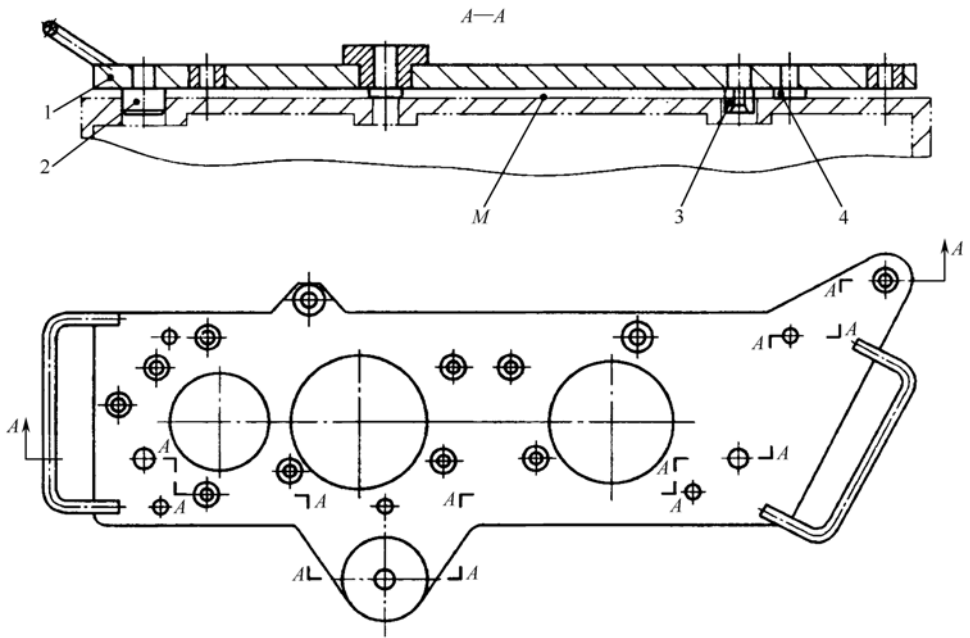
1—立轴式通用回转工作台；2—定位盘；3—心轴；4—开口垫圈；5—螺母；6—可换钻套；

7—止动螺钉；8—菱形螺母；9—铰链式钻模板；10—钻模板支架

图 2-51 立轴式通用转台应用实例

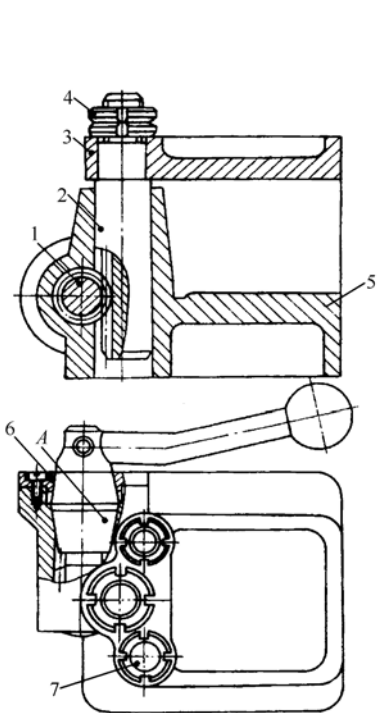
盖板式钻模的特点是没有夹具体。如图 2-52 所示为加工车床溜板箱上多个小孔的盖板式钻模，它用圆柱销 2 和菱形销 3 在工件两孔中定位，并通过三个支承钉 4 安放在工件 *M* 面上。盖板式钻模的优点是结构简单，多用于加工大型工件上的小孔。

滑柱式钻模是一种具有升降模板的通用可调整钻模。如图 2-53 所示为手动滑柱式钻模结构，它由钻模板、滑柱、夹具体、传动和锁紧机构组成，这些结构已标准化并形成系列。使用时，只需根据工件的形状、尺寸和定位夹紧要求，设计、制造与之相配的专用定位、夹紧装置和钻套，并将其安装在夹具基体上即可。图 2-54 所示为其应用实例。



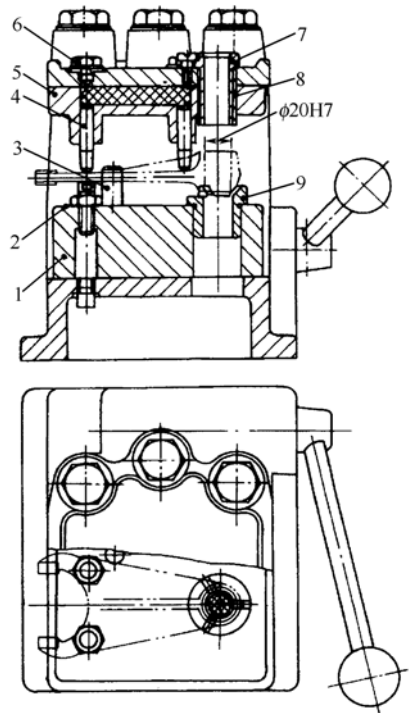
1—钻模板；2—圆柱销；3—菱形销；4—支承钉

图 2-52 盖板式钻模



1—斜齿轮轴；2—齿条轴；3—钻模板
4—螺母；5—夹具体；6—锥套；7—滑柱

图 2-53 手动滑柱式钻模



1—底座；2—可调支承；3—挡销；4—压柱；5—压柱体
6—螺塞；7—钻套；8—衬套；9—定位锥套

图 2-54 滑柱式钻模应用实例

滑柱式钻模的钻模板上升到一定高度时压紧工件后应能自锁。在手动式滑柱式钻模中多采用锥面锁紧机构。如图 2-53 所示,压紧工件后,作用在斜齿轮上的反作用力在齿轮轴上引起轴向力,使锥体 4 在夹具体的内锥孔中楔紧,从而锁紧钻模板。当加工完毕后,升起钻模板到一定高度,此时钻模板自重作用使齿轮轴产生反向轴向力,使锥体与锥套 6 的锥孔楔紧,钻模板也被锁死。

2. 钻模设计要点

1) 钻套

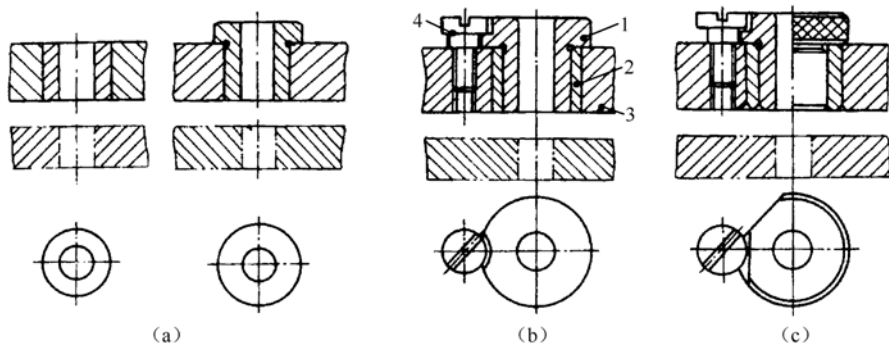
钻套是引导刀具的元件,用于保证被加工孔的位置,并防止加工过程中刀具的偏斜。

钻套按其结构特点可分为四种类型:固定钻套、可换钻套、快换钻套和特殊钻套。

(1) 固定钻套:如图 2-55 (a) 所示,固定钻套直接压入钻模板或夹具体的孔中,位置精度高,但磨损后不易拆卸,故多用于中、小批量生产。

(2) 可换钻套:如图 2-55 (b) 所示,可换钻套以间隙配合安装在衬套中,而衬套则压入钻模板或夹具体的孔中。为防止钻套在衬套中转动,加一个固定螺钉。可换钻套磨损后可以更换,故多用于大批量生产。

(3) 快换钻套:如图 2-55 (c) 所示,快换钻套具有快速更换的特点,更换时无须拧动螺钉,只要将钻套逆时针方向转动一个角度,使螺钉头对准钻套缺口,即可取下钻套。可换钻套多用于同一孔需要多个工步(如钻、扩、铰等)加工的情况。



1—钻套; 2—衬套; 3—钻模板; 4—螺钉

图 2-55 钻套

(4) 特殊钻套:如图 2-56 所示,特殊钻套用于特殊加工场合,如在斜面上钻孔、在工件凹陷处钻孔、钻多个小间距孔等。此时无法使用标准钻套,可根据特殊要求设计专用钻套。

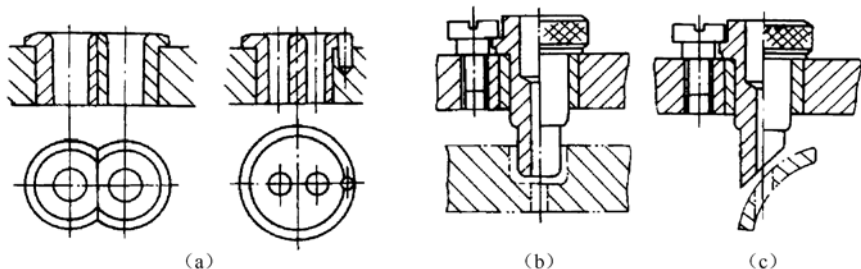


图 2-56 特殊钻套

钻套中导向孔的孔径及其偏差应根据所引导的刀具尺寸来确定。通常取刀具的最大极限尺寸为引导孔的基本尺寸,孔径公差根据加工精度确定。钻孔和扩孔时通常取 F7,粗铰时取 G7,精铰时取 G6。若钻套引导的不是刀具的切削部分而是导向部分,常取配合 H7/f7、H7/g6 或 H6/g5。

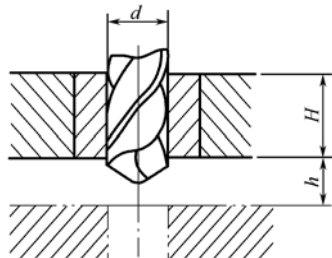


图 2-57 钻套高度与容屑间隙

钻套高度(如图 2-57 所示)直接影响钻套的导向性能,同时影响刀具与钻套之间的摩擦情况,通常取 $H=(1\sim 2.5)d$ 。对于精度要求较高的孔、直径较小的孔和刀具刚性较差时应取较大值。

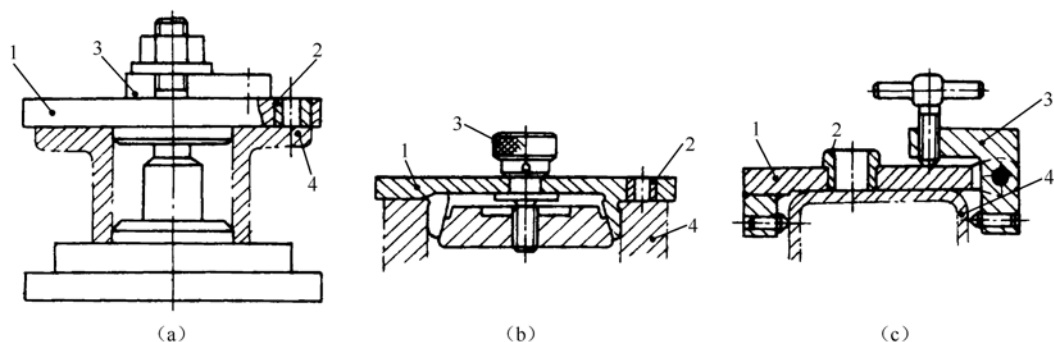
钻套与工件之间一般应留有排屑间隙,此间隙不宜过大,以免影响导向作用。一般可取 $h=(0.3\sim 1.2)d$ 。加工铸铁、黄铜等脆性材料时可取小值;加工钢等韧性材料时应取较大值。当孔的位置精度要求很高时,也可取 $h=0$ 。

2) 钻模板

钻模板用于安装钻套。钻模板与夹具体的连接方式有固定式、铰链式、分离式和悬挂式等几种。

固定式钻模板直接固定在夹具体上,结构简单,精度较高。当使用固定式钻模板装卸工件有困难时,可采用铰链式钻模板。铰链式钻模板通过铰链与夹具体连接,由于铰链处存在间隙,所以精度不高。

如图 2-58 所示为分离式钻模板,这种钻模板是可以拆卸的,工件每装卸一次,钻模板也要装卸一次。与铰链式钻模板相似,分离式钻模板也是为了装卸工件方便而设计的,但精度可以高一些。



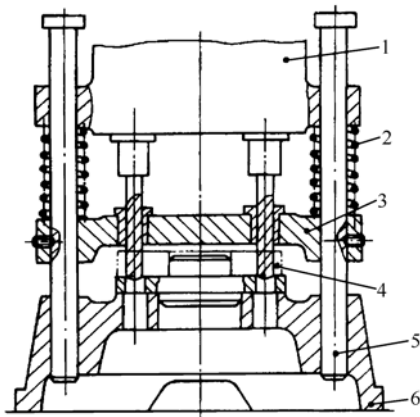
1—钻模板; 2—钻套; 3—夹紧元件; 4—工件

图 2-58 分离式钻模板

如图 2-59 所示为悬挂式钻模板,这种钻模板悬挂在机床主轴上,并随主轴一起靠近或离开工件,它与夹具体的相对位置由滑柱来保证。这种钻模板多与组合机床的多轴头连用。

3) 夹具体

钻模的夹具体一般不设定位或导向装置,夹具通过夹具体底面安放在钻床工作台上,可直接用钻套找正并用压板夹紧(或在夹具体上设置耳座用螺栓压紧)。对于翻转式钻模,通常要求在相当于钻头送进方向设置支脚。支脚可以直接在夹具体上做出,也可以做成装配式。支脚一般应有 4 个,以检查夹具安放是否歪斜。支脚的宽度(或直径)一般应大于机床工作台 T 形槽的宽度。



1—模梁；2—弹簧；3—钻模板；4—工件；5—滑柱；6—夹具体

图 2-59 悬挂式钻模板

2.6.3 铣床夹具

铣床夹具主要用于加工零件上的平面、键槽、缺口及成型表面等。

1. 铣床夹具的类型与典型结构

由于铣削过程中, 夹具大都与工作台一起做进给运动, 而铣床夹具的整体结构又与铣削加工的进给方式密切相关, 故铣床夹具常按铣削的进给方式分类, 一般可分为直线进给式、圆周进给式和仿形进给式三种。

直线进给式铣床夹具用的最多,根据夹具上同时安装工件的数量,又可分为单件铣夹具和多件铣夹具。如图 2-60 所示为铣工件斜面的单件铣夹具。工件以一面两孔定位,为保证夹紧力作用方向指向主要定位面,两个压板的前端做成球面。联动机构则使操作简便,且使两压板夹紧力均衡。为了确定对刀块的位置,在夹具上设置了工艺孔 O 。

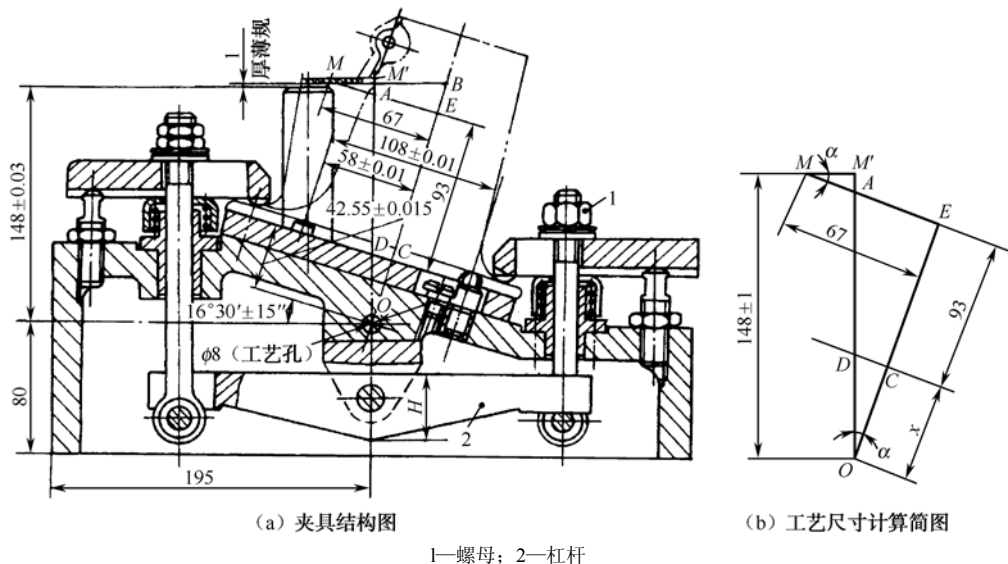


图 2-60 铣斜面夹具

如图 2-61 所示为铣轴端方头的多件铣夹具，一次安装 4 个工件同时进行加工。为了提高生产率，且保证各工件获得均匀一致的夹紧力，夹具采用了联动夹紧机构并设置了相应的浮动环节（球面垫圈与压板）。

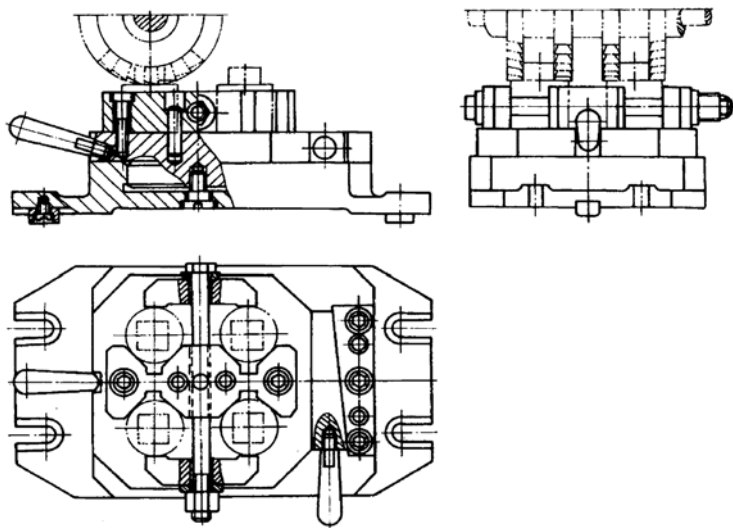


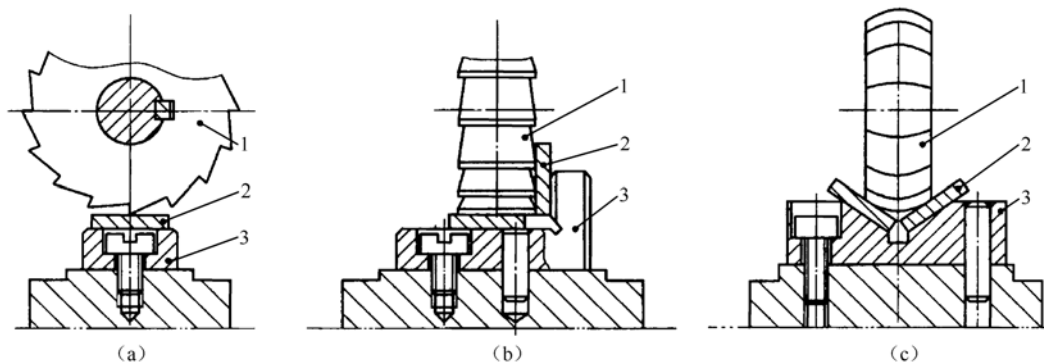
图 2-61 铣四方头夹具

2. 铣床夹具设计要点

(1) 铣床夹具总体结构。铣削加工的切削力较大，又是断续切削，加工中易引起振动，故要求铣床夹具受力元件要有足够的强度和刚度。夹紧机构所提供的夹紧力应足够大，且有较好的自锁性能。为了提高夹具的工作效率，应尽量采用机动夹紧或联动夹紧机构，并在可能的情况下，采用多件夹紧和多件加工。

(2) 对刀装置。对刀装置用于确定夹具相对于刀具的位置，铣床夹具的对刀装置主要由对刀块和塞尺构成。如图 2-62 所示为几种常用的对刀块。其中图 2-62 (a) 所示为高度对刀块，用于加工平面时对刀；图 2-62 (b) 所示为直角对刀块，用于加工键槽或台阶面对刀；图 2-62 (c) 所示为成型对刀块，当采用成型铣刀加工成型表面时，可用这种对刀块对刀。

塞尺用于检查刀具与对刀块之间的间隙，以避免刀具与对刀块直接接触而造成刀具或对刀块的损伤。



1—铣刀；2—塞尺；3—对刀块

图 2-62 对刀块

(3) 夹具体。铣床夹具的夹具体要承受较大的切削力,故要求要有足够的强度、刚度和稳定性。通常在夹具体上要适当地布置筋板,夹具体的安装面要足够大,且尽可能采用周边接触的形式。

铣床夹具通常通过定向键与铣床工作台 T 形槽的配合来确定夹具在铣床工作台上的方位。如图 2-63 所示为定向键的结构及应用情况。定向键与夹具体的配合多采用 H7/h6。为了提高夹具的安装精度,定向键的下部(与工作台 T 形槽的配合部分)可留有余量以进行修配,或在安装夹具时使定向键一侧与工作台 T 形槽靠紧,以消除配合间隙影响。铣床夹具大都在夹具体上设计有耳座,并通过 T 形槽螺栓将夹具紧固在工作台上。

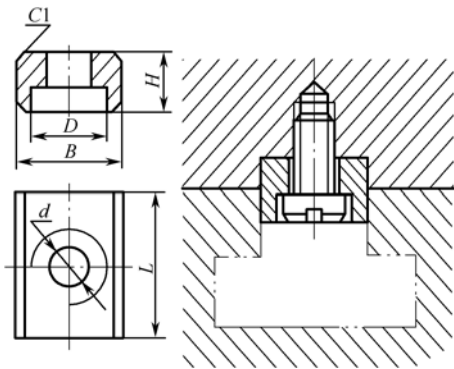
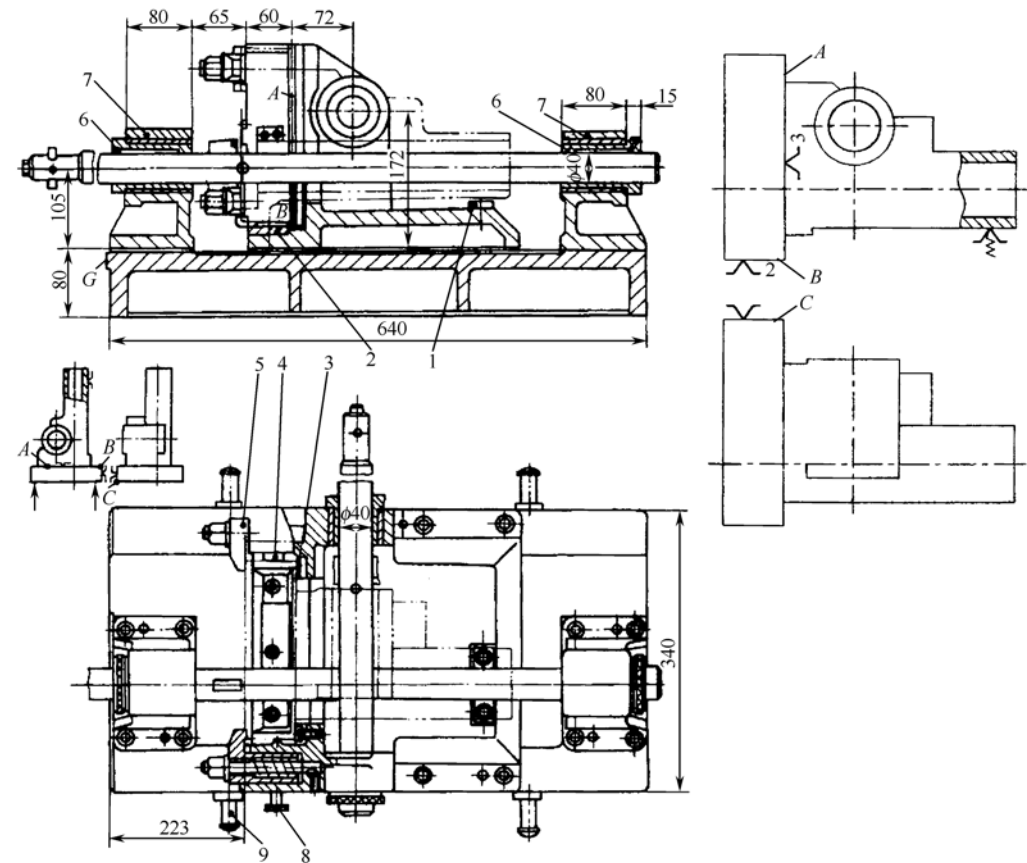


图 2-63 定向键



1—横梁; 2—弹簧; 3—钻模板; 4—工件; 5—滑柱; 6—夹具体

图 2-64 悬挂式钻模板

具有刀具导向的镗床夹具，习惯上又称为镗模，镗模与钻模有很多相似之处。如图 2-64 所示镗模用于镗削泵体上两个相互垂直的孔。工件以 A 、 B 、 C 面分别与支承板 3、2 和挡块 4 相接触而定位，并采用 4 个钩形压板 5 压紧。两镗杆由镗套 6 支持并导向，镗套安装在镗模支架 7 上。镗模支架安放在工件的两侧，这种导向方式称为双面导向。在双面导向的情况下，要求镗杆与机床主轴浮动连接。此时，镗杆的回转精度完全取决于两镗套的精度，而与机床主轴回转精度无关。

为便于夹具在机床上安装，镗模底座上设有耳座和起吊螺栓（或起吊孔）。此外，在镗模底座侧面还加工出细长的找正基面（如图 2-64 中的 G 面），用于找正夹具定位元件或导向元件的位置以及夹具在机床上安装的位置。

习题 2

- 2-1. 机床夹具由哪几部分组成？
- 2-2. 什么是六点定位原理？什么是完全定位与不完全定位？什么是欠定位与过定位？分别举例说明。
- 2-3. 怎样分析工件应限制哪几个自由度？
- 2-4. 常见的定位元件有哪些？各能限制哪些自由度？
- 2-5. 定位误差由哪几部分组成？
- 2-6. 如图 2-65 所示为连杆小头孔精镗工序的定位简图。选择大头孔及其端面和小头孔为定位基准，分别用带台肩定位销和可插拔的削边定位销定位。试分析各定位元件限制工件哪些自由度。

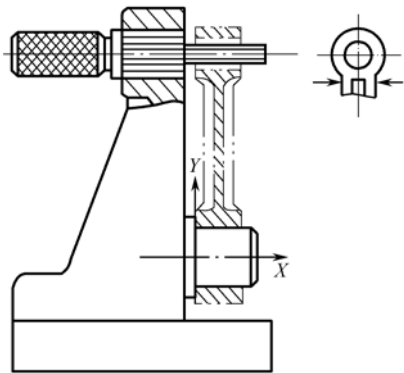


图 2-65 为连杆小头孔精镗工序

2-7. 根据六点定位原理分析图 2-66 所示各定位方案中每个定位元件所限制的自由度。

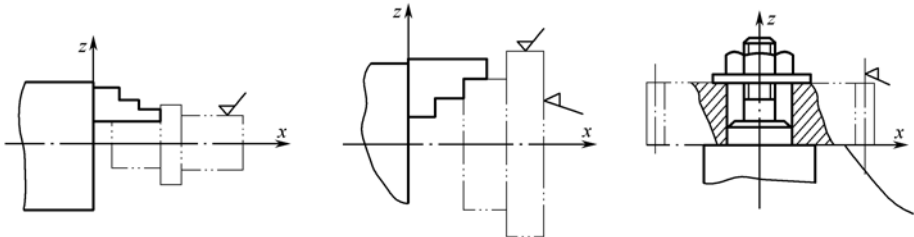


图 2-66 题 2-7 图

2-8. 在如图 2-67 所示的套筒类零件上铣一缺口，其尺寸要求见零件图。采用三种不同的定位方案。试分别计算它们的定位误差，并判断能否满足加工要求。

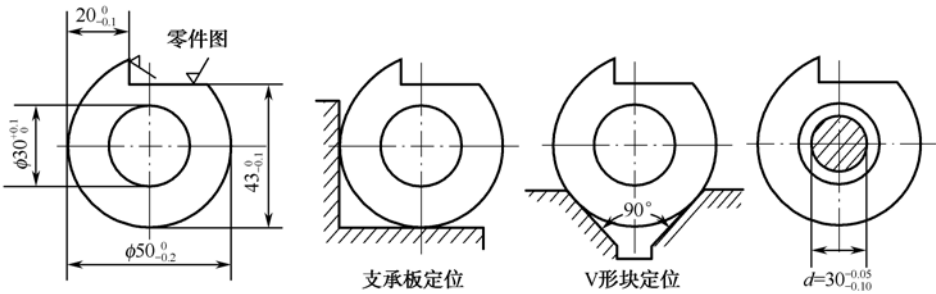


图 2-67 套筒类零件铣缺口

2-9. 试分析三种基本夹紧机构的优缺点及其应用。

第 3 章

典型零件加工与加工方法

3.1 轴类零件加工

3.1.1 概述

1. 轴类零件的功用、分类与结构特点

轴类零件是各种机器中常见的典型零件之一，其主要功用是支承传动零部件（齿轮、皮带轮、离合器等）、传递扭矩和承受载荷。根据其形状结构特点可分为光轴、空心轴、半轴、阶梯轴、花键轴、十字轴、偏心轴、曲轴和凸轮轴等，如图 3-1 所示。

从轴类零件的结构特征来看，它们都是长度 L 大于直径 d 的旋成体零件，其加工表面主要有内外圆柱面、内外圆锥面、螺纹、花键、横向孔、沟槽等。

2. 轴类零件的技术要求

轴类零件的技术要求是根据其主要功用和工作条件制定的，下面以 CA6140 型车床主轴为例进行分析，如图 3-2 所示。

（1）尺寸精度。轴的支承轴颈、配合轴颈是轴类零件的主要表面，它影响轴的旋转精度与工作状态。支承轴颈和配合轴颈的尺寸精度通常为 IT6~9 级公差，特别精密的轴颈为 IT5 级，甚至更高。

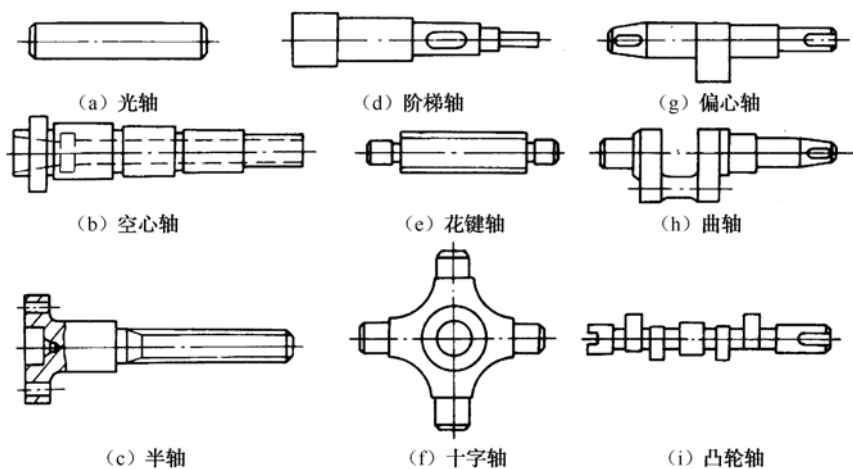


图 3-1 轴的种类

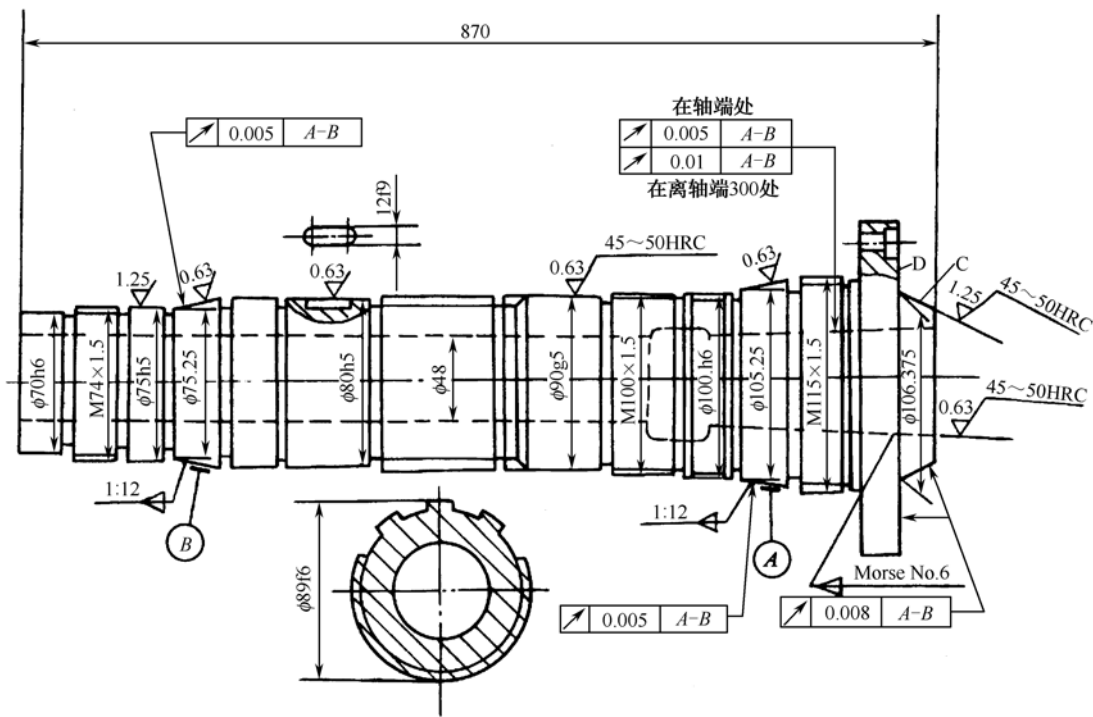


图 3-2 CA6140 车床主轴简图

- (2) 几何形状精度。轴的形状精度主要指圆度、圆柱度，一般应限制在直径公差范围内。对支承轴颈、配合轴颈来说，圆度、圆柱度公差一般为 6~9 级形状公差。
- (3) 相互位置精度。轴的位置精度的基本要求是保证配合轴颈相对支承轴颈的同轴度、径向圆跳动，以及定位端面与轴心线的垂直度，一般为 5~10 级位置公差。
- (4) 表面粗糙度。轴的表面大都有粗糙度的要求。随着机器高速和精密化的发展，对轴的表面粗糙度值要求也越来越小，机床主轴各表面粗糙度的要求可参考表 3-1。

表 3-1 机床主轴各表面粗糙度要求

项 目		普通车床 R_a (μm)	精密车床 R_a (μm)
支承轴颈	滑动轴承	0.2	0.1~0.05
	滚动轴承	0.4	0.4
主轴前端锥孔		0.8~0.4	0.1~0.05
与齿轮配合轴颈		0.8~0.4	0.4~0.2
一般表面		6.3~1.6	3.2~0.8

3. 轴类零件的材料、毛坯及热处理

1) 轴类零件的材料

轴类零件应根据不同工作条件和使用要求选用不同的材料和不同的热处理，以获得一定的强度、韧性和耐磨性。

一般轴类零件的材料常用 45 号钢，经过调质可得到较好的切削性能，而且能获得较高的强度和韧性等综合力学性能，重要表面经局部淬火后再回火，表面硬度可达 HRC45~52。对于中等精度而转速较高的轴，可选用 40Cr 等合金结构钢，这类钢经调质和表面淬火处理后，具有较高的综合力学性能。轴承钢 GCr15 和弹簧钢 65Mn 可制造较高精度的轴，这类钢经调质和表面高频感应加热淬火后再回火，表面硬度可达 HRC50~58，并具有较高的耐疲劳性能和耐磨性。对于高转速、重载荷等条件下工作的轴，可选用 20CrMnTi、20Mn2B 等低碳合金钢或 38CrMoAl 中碳合金渗氮钢。低碳合金钢经渗碳淬火处理后，具有很高的表面硬度、耐冲击韧性和心部强度，但是热处理变形较大；而渗氮钢经调质和表面渗氮后，热处理变形小且硬度很高，具有很好的耐磨性和耐疲劳强度。

2) 轴类零件的毛坯

轴类零件最常用的毛坯有圆棒料和锻件，只有某些大型、结构复杂的轴使用铸件。由于毛坯经加热锻打后，能使金属内部纤维组织沿表面均匀分布，从而得到较高的机械强度，所以除光轴或直径相差不大的阶梯轴可使用热轧棒料和冷拉圆棒料外，一般比较重要的轴都采用锻件毛坯。

根据生产规模的不同，毛坯的锻造方法有自由锻和模锻两种。自由锻所需设备简单，但制成的毛坯精度低、加工余量大、生产率低，只适用于单件小批量生产。与自由锻相反，模锻精度高、余量小、生产率高，且可锻造形状复杂的毛坯。但是模锻需要昂贵的设备和专用锻模，所以适用于大批量生产。

3) 轴类零件的热处理

轴的质量除了与所选钢材种类有关外，还与毛坯形式及热处理有关。轴的锻造毛坯在机械加工之前，均需进行正火或退火处理（含碳量大于 0.7%的碳钢和合金钢），使其晶粒细化，消除锻造后的残余应力，降低毛坯硬度，改善切削加工性能。

凡精度要求较高的轴，常在粗加工后、淬火前安排调质处理，以获得均匀细密的组织、较高的强度和韧性等综合机械性能。轴类零件的最终热处理，一般包括局部淬火后回火、渗碳淬火、氮化等。最终热处理应在磨削工序之前进行，而氮化一般在粗磨之后、精磨之前进行，通过磨削消除局部淬火后的变形。最终热处理的目的是在保持心部韧性的同时提高表面硬度，以获得较高的耐磨性和耐疲劳强度。

3.1.2 CA6140 车床主轴的加工工艺

轴类零件的加工工艺因其用途、结构形状、技术要求、材料种类、产量大小等因素而有所差异。日常的工艺工作中，遇到的大量工作是一般轴的工艺编制。主轴零件工艺路线长、难度大，是轴类零件中有代表性的零件，它涉及轴类零件加工中的许多基本工艺问题，所以本节将以 CA6140 型车床主轴为例进行工艺分析。

1. 主轴的技术条件分析

从图 3-2 所示的车床主轴零件简图可以看出，主轴的支承轴颈 A、B 是主轴部件的装配基准，它的制造精度直接影响主轴部件的回转精度，当支承轴颈不圆、不同轴时，将引起主轴的回转误差，直接影响零件的加工质量，所以对 A、B 两段轴颈提出了很高的要求。

主轴莫氏锥孔是用来安装顶尖或工具锥柄的，其锥孔中心线必须与支承轴颈的基准轴线严格同轴，否则会使工件产生相对位置误差。

主轴前端圆锥面和端面是安装卡盘的定位表面。为了保证卡盘的定位精度，该圆锥表面必须与支承轴颈同轴，端面必须与主轴轴线垂直。

主轴上的螺纹用于固定零件或调整轴承间隙，当螺纹与支承轴颈中心线歪斜时，会引起主轴部件锁紧螺母的端面跳动，导致滚动轴承内圈中心线偏斜，从而引起主轴径向圆跳动。因此在加工主轴螺纹时，必须控制螺纹中径与支承轴颈的同轴度。

主轴轴向定位面与主轴旋转轴线不垂直，会使主轴产生周期性的轴向窜动。当加工工件端面时，会造成工件端面对旋转轴线的垂直度达不到要求；当加工螺纹时，会使工件相邻螺距产生误差。

由上面分析可知，主轴的支承轴颈、配合轴颈、锥孔、前端圆锥面及端面、锁紧螺母的螺纹等表面要求较高，是轴的主要加工表面。其中，支承轴颈本身的尺寸精度、几何形状精度、相互位置精度以及表面粗糙度要求更高，这是主轴加工中的主要矛盾。在加工主轴时，紧紧抓住这个主要矛盾，其他问题就可迎刃而解了。

2. 主轴的加工工艺过程

经过对主轴的结构特点、技术要求进行深入分析后，可以根据生产批量、设备条件等因素，考虑主轴的工艺过程。CA6140 车床主轴大批量生产的加工工艺过程见表 3-2。

表 3-2 主轴加工工艺过程

序 号	工 序 名 称	工 序 简 图	加 工 设 备
1	备料		
2	精锻		立式精锻机
3	热处理	正火	
4	铬头		
5	铣端面 and 钻中心孔		专用机床
6	荒车	车各外圆面	卧式车床

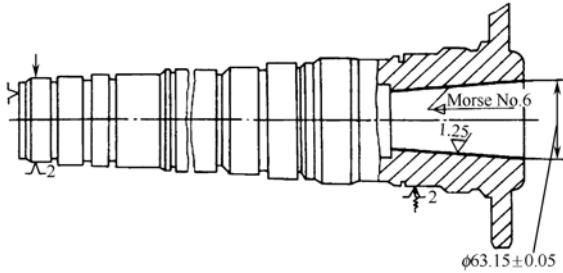
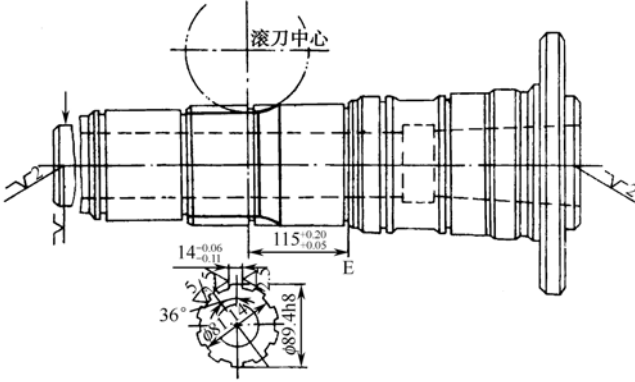
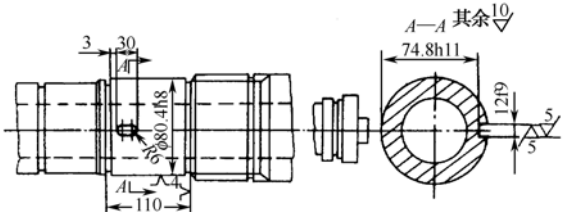
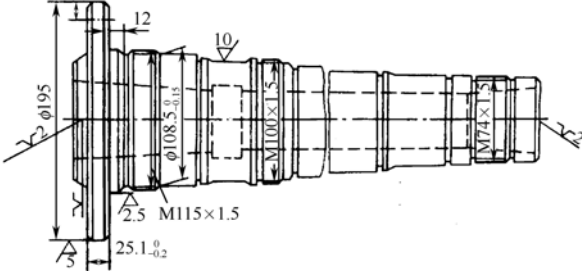
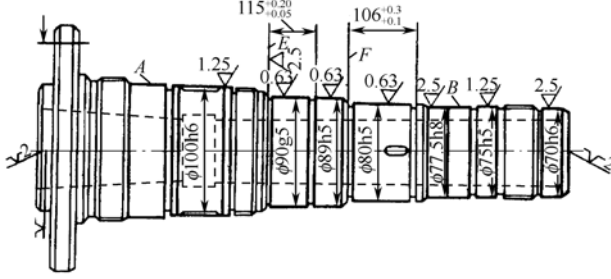
续表

序 号	工 序 名 称	工 序 简 图	加 工 设 备
7	热处理	调质 220~240HBS	
8	车大端各部		卧式车床 C620 B
9	仿形车小端各部		仿形车床 CE7120
10	钻深孔		专用深孔钻床
11	车小端内锥孔（配 1: 20 锥堵）		卧式车床 C620 B

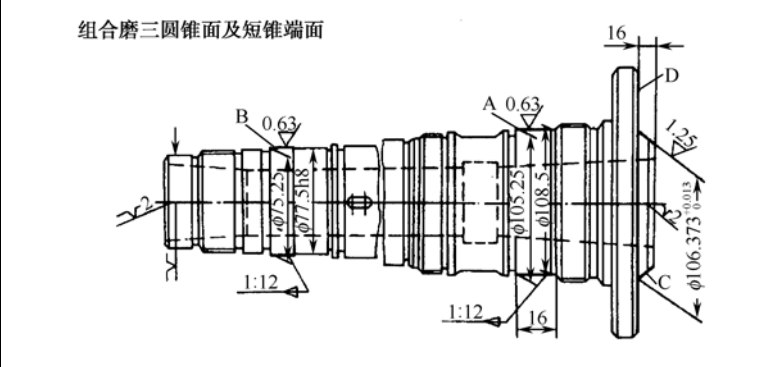
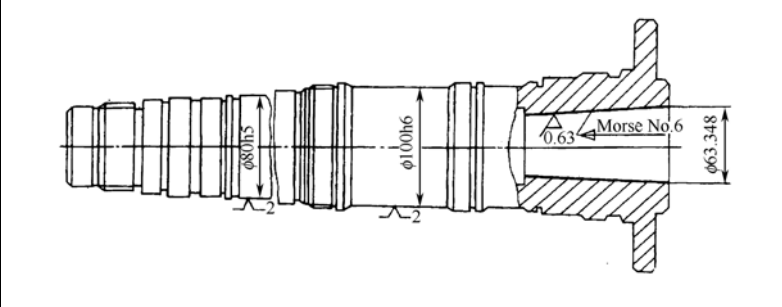
续表

序 号	工 序 名 称	工 序 简 图	加 工 设 备
12	车大端锥孔 (配 Morse No.6 锥堵); 车前端圆锥面及端面		卧式车床 C620 B
13	钻大端端面 各孔		钻模, Z55 钻床
14	热处理	高频淬火 $\phi 90$ g6mm, 短锥及 Morse No.6 锥孔, HRC45~50	
15	精车各外圆 并车槽		数控车床 CSK6163
16	粗磨外圆二 段		万能外圆磨床 M1432

续表

序 号	工 序 名 称	工 序 简 图	加 工 设 备
17	粗磨 Morse No.6 锥孔		内圆磨床 M2120
18	粗精铣花键		花键铣床 YB6016
19	铣键槽		铣床 X52
20	车大端内侧面及三段螺纹 (配螺母)		卧式车床 CA6140
21	粗精磨各外圆及 E、F 两端面		万能外圆磨床 M1432A

续表

序 号	工 序 名 称	工 序 简 图	加 工 设 备
22	粗精磨圆锥面		专用组合磨床
23	精磨 Morse No.6 内锥孔		主轴锥孔磨床
24	检查	按图样技术要求项目检查	

3. 主轴加工工艺过程分析

从上述主轴加工工艺过程可以看出，在拟定主轴零件加工工艺过程时，应考虑下列共性问题。

1) 加工阶段的划分

由表 3-2 所示主轴加工工艺过程可以看出，根据粗、精加工分开原则来划分阶段极为必要。这是由于主轴毛坯余量较大且不均匀，当切除大量金属后，会引起内应力重新分布而变形。因此，主轴加工通常以主要表面加工为主线，划分为三个阶段：粗加工阶段，包括粗车各挡外圆、钻中心通孔等；半精加工阶段，包括半精车各挡外圆及两端锥孔、精镗中心通孔等；精加工阶段，包括粗、精磨各挡外圆或锥孔，其他次要表面适当穿插在各个阶段进行。各阶段的划分大致以热处理为界，将整个加工过程按粗、精加工划分为不同的阶段，这是制订工艺进程的一个原则，目的是为了保证加工质量和降低生产费用。一般精度的主轴，精磨为最终工序。对于精密主轴，还应有光整加工阶段。

2) 定位基准的加工选择

轴类零件加工的定位基准，最常用的为两顶尖孔。因为轴类零件外圆表面、锥孔、螺纹表面的同轴度、端面的垂直度、锥孔的圆跳度，均与主轴的中心线有关。它们的设计基准，一般都是主轴的中心线，所以采用两中心孔作为定位基准，能最大限度地在一次安装中加工出多个外圆，且位置精度易于保证，又符合基准统一原则。因此只要有可能，就应尽量采用顶尖孔作为轴加工的定位基准。

CA6140 车床主轴属于空心主轴，在其加工过程中，作为定位基准的中心孔将因钻出通孔而消失，因此必须交替使用中心孔和外圆表面作为定位基面。为了在通孔加工以后还能使用中

心孔作为定位基准,一般都采用带中心孔的锥堵或锥套心轴。当主轴孔锥度比较小时(如上述车床主轴锥孔锥度为莫氏6号),就使用锥堵(如图3-3(a)所示),当锥孔的锥度较大(如铣床主轴)或为圆柱孔时,可用锥套心轴(如图3-3(b)所示)。

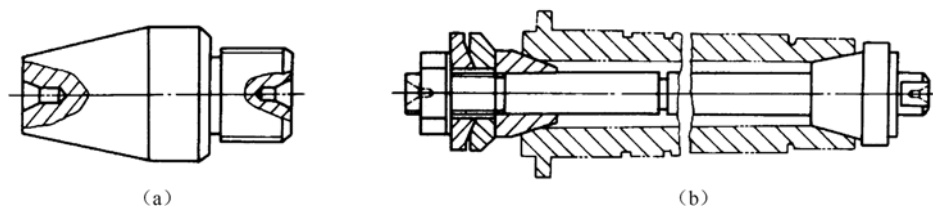


图 3-3 锥堵与锥套心轴

采用锥堵定位应注意以下问题:锥堵应具有较高的精度,锥堵的中心孔既是锥堵本身制造的定位基准,又是磨削主轴的精基准,所以必须要保证锥堵的锥面与中心孔有较高的同轴度。在使用中,应尽量减少锥堵安装次数。重新安装会引起安装误差,加工中、小批量主轴,锥堵安装后中途不得更换。

3) 热处理工序的安排

CA6140 主轴的热处理是主轴加工工艺过程中最重要的组成部分,它关系到主轴的机械性能、使用寿命及加工精度,并能改善主轴切削加工性能。一般热处理工序安排在各加工阶段进行。

(1) 毛坯热处理:主轴锻造后安排正火或退火,以消除锻造应力、改善金属组织、细化晶粒、降低硬度、改善切削加工性能。

(2) 预备热处理:通常采用调质或正火处理,安排在粗加工后,使主轴获得一定的硬度和强度,具有良好冲击韧性,消除粗加工应力。

(3) 最终热处理:包括局部淬火后回火、渗碳淬火和氮化等。最终热处理视主轴材料而异,一般安排在精加工前进行,可保证淬火引起的局部变形在精加工中得到纠正。

(4) 定性处理:对于精密主轴,在淬火后还要进行定性处理。定性处理一般采用冰冷处理,以进一步消除加工应力,提高主轴尺寸稳定性,保持主轴精度。CA6140 车床主轴不需要进行定性处理。

4) 工序安排顺序

经过上述几个问题的分析可以看出,一般主轴加工工序的安排可归纳为:备料→锻造毛坯→正火→车端面打中心孔→粗车→调质→半精车→精车→表面淬火→粗、精磨外圆表面→磨内锥孔。但在具体安排工序时,还应注意以下几点。

(1) 基准先行:当毛坯进入机械加工车间后,到底先加工哪些表面呢?这里有一个基本原则,就是“基准先行”原则,也就是说首先加工定位基准面,使零件便于在定位与夹紧后进行加工。例如粗加工阶段,必须在中心孔加工好后,方可粗车各外圆;半精加工阶段,必须在完成锥堵安装之后,才能进行辅助表面加工与半精车各外圆;最后锥孔精磨,又必须完成外圆的精加工后,以外圆为基准进行磨锥孔等。

(2) 深孔加工:应安排在调质以后进行,因为调质处理变形较大,深孔易产生弯曲变形而无法纠正。深孔加工应安排在外圆粗车或半精车之后,以便有一个较精确的轴颈作为定位基面,以保证孔与外圆同心,使主轴壁厚均匀。

(3) 外圆表面的加工顺序:先加工大直径外圆,然后再加工小直径外圆,以免一开始就降低了工件的刚度。

(4) 次要表面加工顺序：次要表面的加工一般穿插在各个加工阶段。例如，主轴上的花键、键槽等表面的加工，一般放在外圆精车或粗磨之后、精磨外圆之前进行。因为如果在精车前铣出键槽，在精车时由于断续切削引起振动，易损坏刀具，影响加工质量，另外也难以控制键槽的尺寸要求。但这些表面也不宜在主要表面精磨以后进行，以免破坏主要表面的已有精度。

主轴上的螺纹均有较高的要求，如果在淬火前加工，则淬火后产生变形，影响螺纹和支承轴颈的同轴度误差。因此，车螺纹应在主轴局部淬火之后进行。

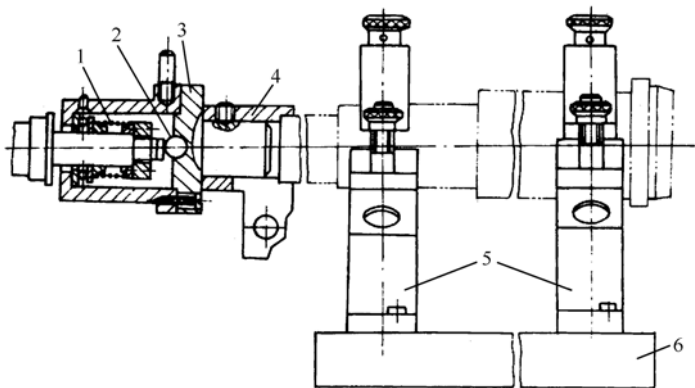
5) 主轴锥孔的磨削

主轴的前端锥孔是安装顶尖或定位心轴的定位基准，它的质量好坏直接影响车床的质量，所以主轴锥孔磨削是轴加工的关键工序。

对于轴前端锥孔，除对其本身精度、接触面积有较高要求外，对它的中心线与轴的支承轴颈的同轴度也有较严格的要求。因此，为了保证同轴度的要求，轴的锥孔磨削工序一般选支承轴颈作为定位基准。

单件小批生产时，可在一般磨床上进行加工。尾端夹持在四爪卡盘上，前端用中心架支承在前锥附近的精密外圆上，经过严格校正后方可进行加工。这种方法辅助时间长，生产效率低，质量不稳定。

成批生产大都采用专用夹具进行加工，图 3-4 所示为磨主轴锥孔的专用夹具。



1—弹簧；2—钢球；3—浮动夹头；4—弹性套；5—支承架；6—底座

图 3-4 磨主轴锥孔的专用夹具

夹具由底座、支承架和浮动夹头三部分组成。前、后两个支承架与底座连成一体，工件中心必须保持与砂轮中心等高。浮动夹头的锥柄装在磨床主轴锥孔内，工件尾端插入弹性套内。用弹簧把弹性套连同工件向后拉，使弹性套紧靠在钢球上，消除了前支承的空隙，依靠弹簧张力限制了工件的轴向窜动。采用这种浮动连接方式，可以保证主轴支承轴颈的定位精度，不受内圆磨床主轴回转误差及机床振动的影响。

3.1.3 丝杠加工工艺

1. 丝杠的功用、分类与结构特点

丝杠是将旋转运动转变成直线运动的传动零件之一。它不仅能传递一定的动力，准确传递

运动,而且可作为精密的直线分度元件,所以对丝杠的强度、耐磨性和加工精度等方面都有较高的技术要求。

丝杠的分类方法如下:

(1) 按摩擦特性可分为滑动丝杠、滚动丝杠及静压丝杠三大类。滑动丝杠的结构比较简单,制造工艺方便,使用最广。滚动丝杠摩擦系数小,制造精度高,多用于数控机床工作台的传动。静压丝杠因尺寸限制,多用于重载大型机械传动,可减少摩擦损失。

(2) 按牙型可分为梯形、矩形及圆弧形。梯形螺纹与普通三角螺纹相比,具有传动效率、精度高和加工工艺性好等优点。标准梯形丝杠牙型角 $\alpha=30^\circ$,但对于传动精度高的丝杠采用 $\alpha=15^\circ$,因为 α 角减小,丝杠中径尺寸变化,对螺距误差的影响也随之减少。

(3) 按工艺特征可分为正火(或调质)丝杠与淬火丝杠。前者螺纹的精加工可采用车削完成,多为普通精度丝杠,后者螺纹的精加工可采用磨削,多为精密丝杠。

(4) 按结构特点可分为整体式丝杠与接长式丝杠,因热处理与加工设备规格所限制,对于过长的丝杠采用分段加工,然后逐段连接成整体。应当指出,接长式丝杠的制造、连接与调整工艺十分复杂。

JB 2886—81 规定了丝杠分 5~9 级,5 级用于坐标镗床、螺纹磨床或做标准丝杠;6 级用于螺纹磨床、齿轮磨床、刻线机、坐标磨床;7 级用于高精度螺纹车床、铲齿机床;8 级用于普通车床及螺纹铣床;9 级用于刨床、钻床及普通车床进给机构。

2. 丝杠的材料

由于丝杠精度高、刚性差,加工中容易产生残余应力和变形,为保证丝杠质量,在选择丝杠材料时应当注意以下几点:

(1) 丝杠材料要有足够强度与良好的耐磨性能,保证能传递的动力与工作寿命。

(2) 金相组织稳定性好,金相组织的稳定性对于丝杠的残余应力和变形影响大,若不稳定,会引起残余应力(或残余应力重新分布),产生变形,使丝杠丧失原有精度。

(3) 丝杠材料应具有良好的切削性能,具备易切削、切削抗力小、不易发生黏刀或啃刀、刀具磨损慢等特点。

(4) 具有良好的热处理工艺性(淬透性好、热处理变形小、不易产生裂纹),并能获得较高的硬度,保证取得良好的耐磨性。

考虑上述条件,常用的丝杠材料分为如下两类:

(1) 不淬硬丝杠材料,对于精度不高(8 级以下)的丝杠,常选用 45 号优质碳素结构钢,它具有综合的力学性能和耐磨性,成本低,但其加工工艺性不太好,易发生啃刀现象,加工后弯曲变形较大。使用 Y40Mn 易切钢,能改善丝杠切削加工工艺性。对于精密机床丝杠,大都选用碳素工具钢 T10A、T12A 等,这种钢具有颗粒珠光体组织,基本能全面满足加工工艺、耐磨性及组织稳定性。

(2) 淬硬丝杠常用碳素合金钢和热处理变形小的合金钢材,如 9Mn2V、CrWMn、GCr15(用于大径小于 50mm)及 GCr15SiMn(用于大径在 50mm 以上)等。这些材料淬硬性好、淬火变形小、磨削时金相组织稳定,硬度可达 HRC58~62,对于滚珠丝杠尤为必要。9Mn2V 淬硬后与 CrWMn 钢相比具有较好的工艺性和尺寸稳定性,但淬透性差,故有用直径小于 50mm 的精密淬硬钢丝。CrWMn 钢突出特点是热处理变形小,但热处理工艺性差,易于产生裂纹,磨削工艺性也不好,易发生磨削裂纹,工艺上应严格控制质量,这种材料适合制造高精度丝杠。

及其他精密零件。

3. 丝杠加工工艺过程

丝杠加工工艺过程，根据被加工丝杆的材料、结构、技术要求、生产批量及工厂的具体生产条件有所不同。这里介绍普通丝杠与精密丝杠两种不同类型的丝杠加工工艺，以便了解丝杠加工的基本方法与工艺过程特点。

1) 不淬硬丝杠加工工艺过程（普通丝杠）

如图 3-5 所示为普通车床丝杠。材料为 Y40Mn 易切钢，精度为 8 级，生产类型为成批生产，其工艺过程见表 3-3。

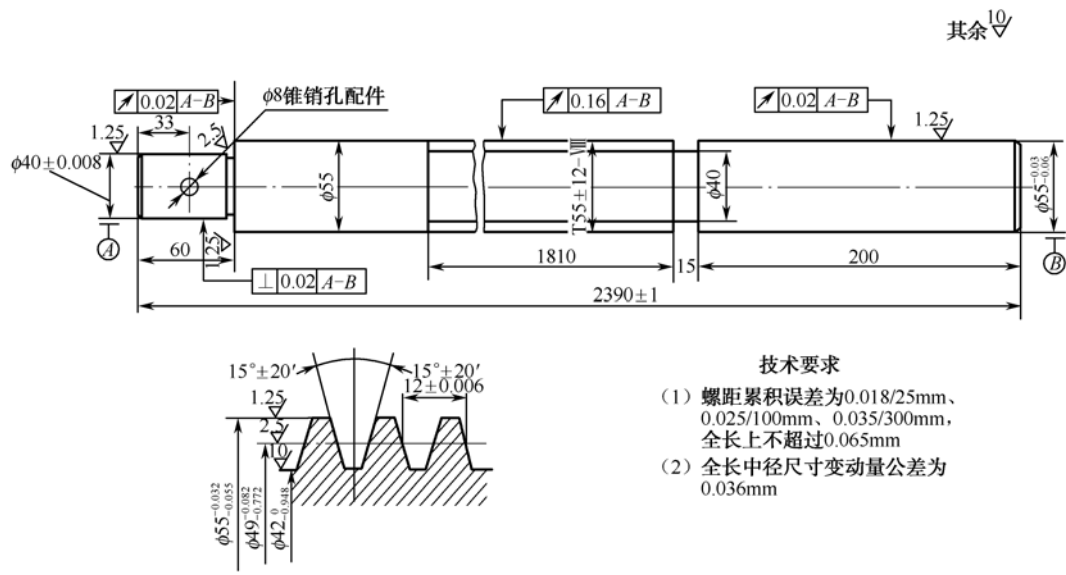


图 3-5 普通车床丝杠

表 3-3 普通车床丝杠工艺过程

序 号	工 序 内 容	定位与夹紧
1	备料φ60×2395mm	
2	加热至调质温度，并用三辊热校直机校直	
3	切削端面，打顶尖孔	夹外圆
4	粗车外圆	双顶尖
5	冷校直，外圆径跳动小于或等于 0.5mm	
6	粗磨φ55mm 外圆至 φ55.3 ^{-0.012} / _{-0.032} mm	双顶尖与外圆
7	修正顶尖孔	
8	粗铣螺纹：每侧面留 0.5~1mm 余量；铣螺纹退刀槽：在 180mm 左端处，长 24mm 备精车螺纹使用	顶尖孔与外圆
9	残余应力消除，时效方式，悬挂一周，每天敲打两次	
10	校直：反向锤击法，击打小径	
11	修研顶尖孔，半精车螺纹，每侧留 0.15mm	顶尖孔与外圆

续表

序 号	工 序 内 容	定位与夹紧
12	校直：外圆径向跳动小于 0.15mm	
13	磨外圆至图样要求	双顶尖与外圆
14	校直：外圆径向跳动 0.08mm 以下	
15	修正两端顶尖孔	
16	精车螺纹至图样要求	双顶尖与外圆

2) 淬硬丝杠加工工艺过程（精密丝杠）

如图 3-6 所示为万能螺纹磨床磨削丝杠。材料为 9Mn2V，精度 6 级，其工艺过程见表 3-4。

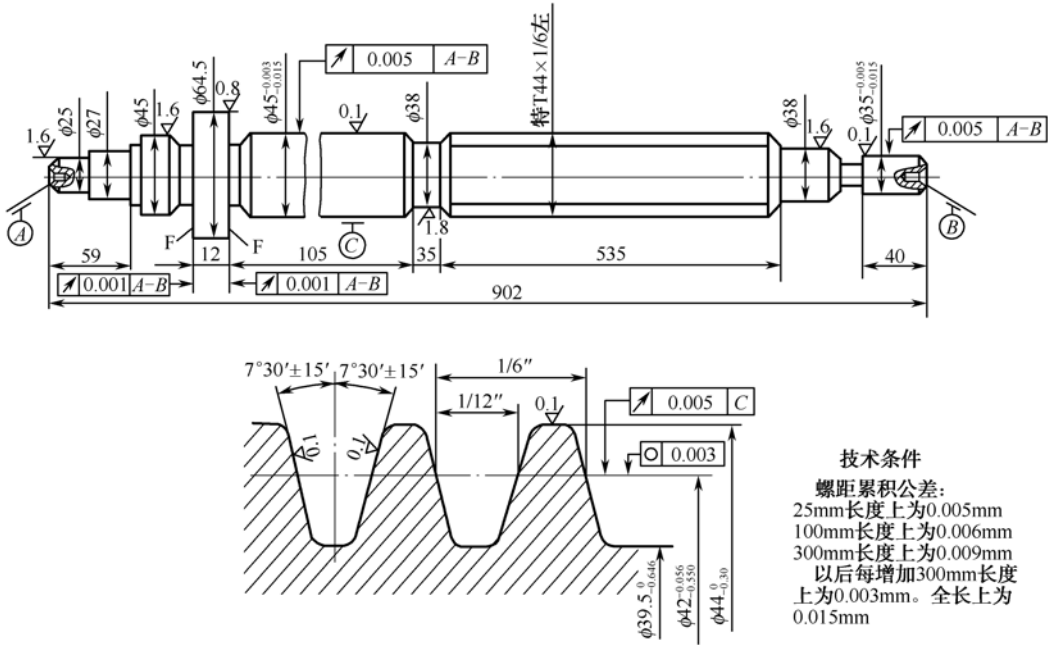


图 3-6 淬硬丝杠加工工艺

表 3-4 万能螺纹磨床磨削丝杠工艺过程

序 号	工 序 内 容	定位 基 准	序 号	工 序 内 容	定位 基 准
1	锻造		13	低温时效	
2	球化退火		14	研磨两顶尖孔	
3	车端面打顶尖孔	外圆表面	15	半精磨外圆	双顶尖孔
4	粗车外圆	双顶尖孔	16	半精磨螺纹	双顶尖孔
5	高温时效		17	低温时效	
6	车端面打顶尖孔	外圆表面	18	研磨两顶尖孔	
7	半精车外圆	双顶尖孔	19	精磨外圆，检查	双顶尖孔
8	粗磨外圆	双顶尖孔	20	精磨螺纹，磨出小径	双顶尖孔
9	淬火，中温回火		21	研磨两顶尖孔	

续表

序 号	工 序 内 容	定 位 基 准	序 号	工 序 内 容	定 位 基 准
10	研磨两项尖孔		22	终磨螺纹，检查	双顶尖孔
11	粗磨外圆	双顶尖孔	23	终磨外圆，检查	双顶尖孔
12	粗磨出螺纹槽	双顶尖孔	24	研磨止推端面，检查	双顶尖孔

4. 丝杠加工工艺分析

为了掌握丝杠加工工艺，现将不淬硬丝杠与淬硬丝杠的工艺过程做一分析，以便了解丝杠工艺要点。

1) 毛坯准备工序

普通丝杠通常要经过备料、热处理和校直工序。热处理工序采用正火或调质，即可获得一定强度，又能改善切削性能，特别是 45 号钢经调质后，硬度为 HBS220~240，可获得韧性、塑性、强度较好的综合力学性能，切削性能也较佳。对于精密丝杠，选用合金钢，需淬硬，其毛坯要经过锻造与退火处理，方能得到良好的金相组织与切削性能。

校直的目的是减少毛坯的弯曲度，使机械加工余量均匀。普通丝杠采用冷校直或热校直工艺。冷校直不需要特别设备，比较简便。热校直方法是先将毛坯加热到正火温度，再用滚筒式校直机校直。此方法生产效率高，校直质量好，但需要特殊设备。精密丝杠不采用校直方法，因为校直会使零件内部产生校直残余应力，随着时间延长，仍然会产生弯曲变形，丧失原有精度。

2) 定位基准面选择

在丝杠加工过程中，顶尖孔虽然是主要基准面，工艺上因消除残余应力多次时效处理，在每次时效后，都要修磨顶尖孔或重打顶尖孔，消除时效产生的变形，确保后续工序的加工面必须与跟刀架的爪或套相接触，防止因切削力造成工件弯曲变形。因此，丝杠外圆表面加工精度，以及与套和爪的接触好坏，都显得十分重要。

3) 机械加工工序的安排

丝杠的机械加工通常包括四个基本阶段，即基准加工、车端面、钻顶尖孔；粗精加工外圆；粗加工螺纹；精加工螺纹。顶尖孔是外圆和螺纹加工时的基准，首先加工出来，空刀槽是加工螺纹所需要的，可安排在加工顶尖孔或外圆车销工序中进行。

尽管丝杠螺纹部分外圆并不是工作表面，然而外圆和顶尖孔互为基准，在精加工螺纹之前，必须安排磨削外圆工序。普通丝杠在无心磨床或万能外圆磨床上进行；精密丝杠通常在万能外圆磨床上进行，避免外圆误差造成螺纹加工的不良。

4) 螺纹加工方法选择

螺纹表面的质量直接影响丝杠的工作好坏，选择螺纹的加工方法就显得十分重要。螺纹加工方法与丝杠精度等级、是否需淬硬、生产效率有密切关系。

粗切螺纹一般在普通车床上车削。由于切削速度限制，切削负荷量大，所以生产效率低。批量较大的生产，采用旋风铣削螺纹或选用螺纹铣床，一次走刀完成全牙深切削（侧面留加工余量），从而提高螺纹粗加工生产率。这种方法为断续切削，振动大，加工质量差，但是刀具冷却好，切削速度高，生产效率好，适用于粗加工螺纹切削。

车削螺纹，切削稳定，加工精度好，方法简单，生产率比较低，对于批量生产不大的厂家，应用仍然广泛。

精加工螺纹的方法取决于丝杆是否淬硬。不淬硬丝杠螺纹的精加工，采用精密螺纹车床，

车刀截形与工件牙间形状相同的成型车刀，两侧面刀刃同时切削的方法，精车螺纹。对于淬硬丝杠螺纹的精加工，通常采用螺纹磨床磨螺纹。

5) 丝杠加工中防止变形的措施

丝杠是细长工件，容易产生弯曲变形。又因为热处理后的金相组织不稳定，残余应力变化也会引起变形。另外，每次切削加工都会造成残余应力重新再分布，产生新的变形。所以在丝杠加工中，防止变形是加工的关键，其措施如下。

对于不淬硬丝杠，在加工工序中安排校直工序以保证各加工工序余量均匀。校直工序不仅在毛坯准备阶段有，机械加工各工序之间，甚至精车螺纹之后也安排校直工序，纠正弯曲度。

(1) 热校直方法：适用于毛坯校直工序，工件在高温状态下校直，不会产生残余应力，生产效率很高。

(2) 冷校直方法：是对已产生变形的未淬硬丝杠的一种校直方法。校直时，在室温条件下使工件产生相反的变形，达到变直。应当认识到，工件虽然暂时变直，但由于材料内部又产生了新的校直残余应力，当切去表层金属后，残余应力又失去平衡，再产生弯曲变形，所以对于精密丝杠，不允许采用冷校直方法克服弯曲变形。

(3) 锤击校直法：是另一种冷校直方法，适用于弯曲度不大、粗车螺纹之后所进行的校直方法。其基本原理是将工件放在一对硬木或黄铜料楔上，工件凸出点向下，用端部同螺纹牙型相似的工具，对正凹处（螺纹小径），用锤敲击，使凹处金属挤向两侧伸长，达到校直的目的。校直后精车螺纹时，不再切削小径，以免破坏残余应力平衡引起弯曲。

防止丝杠变形还可以选用金相组织稳定性好、热处理变形小的材料，安排适当的去应力热处理工序。尤其对于精密丝杠加工，选择材料十分重要，在工序中将安排多次时效处理，消除残余应力；对于已产生弯曲的丝杠，不允许采用校直方法，而是增加加工余量和工序数目，通过多次加工，逐步减小弯曲度，达到最终的精度。

3.1.4 主轴的检验

检验是确保主轴加工质量的一个重要环节。除工序间检验以外，在全部工序完成之后，应对主轴的尺寸、形状、位置和表面粗糙度进行全面的检查，确定主轴是否达到各项技术要求。通过检验的结果可以及时发现各道工序中存在的问题，以便及时纠正，监督工艺过程正常进行。

检验的依据是主轴零件图。检验工作按一定顺序进行，先检验各级外圆的尺寸精度、形状精度，用外观比较法检验各表面的粗糙度及表面缺陷，然后在专用检验夹具上测量位置误差。主要配合表面的硬度应在热处理车间检验。在成批生产时，若工艺过程比较稳定，且机床精度较好，有些项目常常采用抽检的办法，并不逐项检验。

如图 3-7 所示为主轴的专用检验夹具及检验方法。在倾斜的夹具底座上固定着两个 V 形块及一个挡铁。主轴以支承轴颈在 V 形块上定位。在主轴的小头锥孔中装入一个锥形堵塞（堵塞上有中心孔），主轴因自重的作用通过堵塞、钢珠顶在夹具的挡块上，达到轴向定位的目的。在主轴的大头锥孔中插入一根检验心棒，它的测量部分长 300mm。按照检验要求在各有关位置上放置千分表。用手轻轻转动主轴，从千分表读数的变化即可测出各项误差，包括主轴锥孔及有关表面相对支承轴颈的径向圆跳动和端面圆跳动。

为了消除检验心棒测量部分和圆锥体之间的同轴度误差，在测量主轴端及 300mm 处跳动时，应将心棒转过 180° 插入主轴锥孔后再测量一次，然后取两次读数的平均值，即可使心棒

的同轴度误差相互抵消,不影响测量的结果。

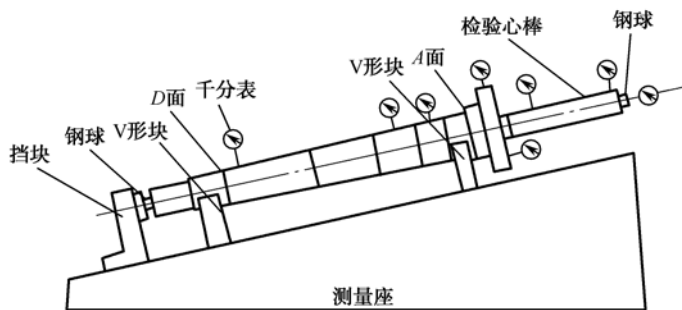


图 3-7 主轴专用检验夹具检验方法

锥孔的接触精度用专用锥度量规涂色检验,要求接触面积在 70%以上,分布均匀而大端接触较“硬”,即锥度只允许偏小。这项检验应在检验锥孔跳动之前进行。

最后指出,随着主轴转速提高,必要时应对主轴部件进行动平衡检验。

3.2 圆柱齿轮加工

3.2.1 概述

圆柱齿轮是机械传动中应用极为广泛的零件之一,其功用是按规定的传动比传递运动和动力。齿轮加工在机械制造中占有重要的位置,随着科学技术的飞速发展,对齿轮的精度、寿命和噪声提出了越来越高的要求。如何合理地制定齿轮的加工工艺规程,达到既提高质量又降低成本的目的,成为一项重要的任务。

1. 圆柱齿轮的结构特点

圆柱齿轮是由齿圈和轮体两部分构成的,在齿圈上切出直齿、斜齿等齿形,而在轮体上有孔或带有轴。

轮体的结构形状直接影响齿轮加工工艺的制订。因此,齿轮可根据齿轮轮体的结构形状来划分。在机器中,常见的圆柱齿轮有以下几类(如图 3-8 所示):盘类齿轮、套类齿轮、装配式齿轮、内齿轮、轴类齿轮、扇形齿轮、齿条等。其中,盘类齿轮、套类齿轮、轴类齿轮应用最广。

2. 圆柱齿轮传动的精度要求

齿轮传动精度的高低,对整个机器的工作性能、承载能力和使用寿命都有很大的影响。根据齿轮的使用条件,对齿轮传动主要提出以下四个方面的精度要求。

(1) 传递运动准确性(运动精度):要求齿轮能准确地传递运动,传动比恒定,即要求齿轮一转中的转角误差不超过一定范围。

(2) 传递运动平稳性:要求齿轮传递运动平稳,冲击和振动小,噪声小,即要求齿轮转动

时瞬时传动比的变化量在一定限度内，齿轮在一齿转角内最大转角误差在规定范围内，从而减小齿轮传递运动中的冲击、振动和噪声。

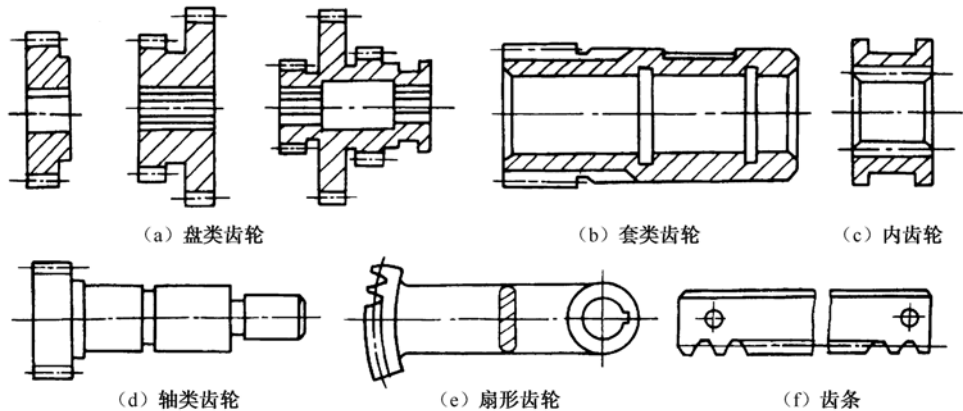


图 3-8 圆柱齿轮的结构形式

(3) 载荷分布均匀性：要求齿轮工作时齿面接触要均匀，并保证有一定的接触面积和符合要求的接触位置，从而保证齿轮在传递动力时不致因载荷分布不均匀而使接触应力过大，引起齿面过早磨损。

(4) 齿侧间隙合理化：要求齿轮传动时，非工作齿面间留有一定间隙，以存储润滑油，补偿因温度、弹性变形所引起的尺寸变化以及加工、装配时的一些误差。

齿轮的制造精度和齿侧间隙主要根据齿轮的用途和工作条件加以规定。对于分度传动用的齿轮，主要要求的是齿轮运动精度，使传递的运动准确可靠；对于高速动力传动用的齿轮，必须要求工作平稳，没有冲击和噪声；对于重载低速传动用的齿轮，则要求齿的接触精度要好，使啮合齿的接触面积最大，不致引起齿面过早磨损；而对于换向传动和读数机构的齿轮，齿侧间隙应严格加以控制，必要时还须消除间隙。

在渐开线圆柱齿轮标准中，对齿轮和齿轮副规定 12 个精度等级。通常认为 2~5 级是高精度等级，6~8 级是中等精度等级，9~12 级是低精度等级。标准按照误差的特性及它们对传动性能的主要影响，将齿轮各项公差分成 I、II、III 三个公差组，见表 3-5。

表 3-5 各公差组对传动性能的主要影响

公差组	公差与极限偏差项目	误差特性	对传动性能的主要影响
I	$F_i', F_p, F_{pk}'', F_{i\beta}'', F_r, F_w$	以齿轮一转为期误差	传递运动的准确性
II	$f_{i\beta}', f_f, f_{pt}, f_{pb}, f_{i\beta}'', f_{f\beta}$	在齿轮一转内，多次周期重复出现的误差	传递运动的平稳性、噪声、振动
III	$F_{\beta}'', F_b, F_{px}''$	齿向、接触线的误差	载荷分布的均匀性

它们分别是评定运动精度、平稳性精度、接触精度的指标。根据使用要求的不同，允许各公差组选用不同的精度等级，但在同一公差组内，各项公差与极限偏差应保持相同的精度等级。

3. 齿轮材料、热处理与毛坯

1) 齿轮材料与热处理

(1) 材料选择。齿轮材料是根据齿轮工作条件进行选择的。常用的材料有锻钢、铸钢和铸铁，其中用锻钢制成的齿轮在各种机械中使用最多。此外，也有用有色金属、非金属材料

布胶木、塑料、尼龙等制造齿轮的。

45 号钢、40Cr 钢齿轮能满足一般传递动力的要求，常用做低速、中等载荷条件下工作的机床齿轮，减速机齿轮等。

20Cr 钢、20CrMnTi 钢齿轮，常用做高速、承受冲击载荷、外形复杂的重要齿轮。钢中含有铬、锰元素，能提高钢的淬透性，芯部具有良好的韧性，硬度可达 HRC58~63；含有钛元素，能提高钢的强度和韧性。

38CrMoAlA 钢齿轮由于经氮化处理后具有更高的表面硬度和耐磨性，且变形小，有较高的抗“咬合”性能，故常用做高速、精密齿轮。

HT20~40、HT30~54 铸铁齿轮易于加工，成本低，且具有高的消震性，但其抗弯强度、耐冲击和耐磨性较差，故常用做低速、轻载、无冲击的齿轮。

(2) 齿轮热处理。齿轮加工中根据不同的目的，一般安排如下两种热处理工序。

① 毛坯热处理：齿坯粗加工前后安排正火或调质，目的是消除锻造及粗加工引起的残余应力，改善材料的切削性能和提高综合机械性能。

② 齿面热处理：齿形加工后，常要对齿面进行渗碳淬火、高频淬火、碳氮共渗或氮化等热处理工序，目的是提高齿面的硬度及耐磨性。

2) 齿轮毛坯

齿轮的毛坯形式主要有棒料、锻件和铸件。棒料用于小尺寸、结构简单而且对强度要求低的齿轮。当齿轮要求强度高，还要耐磨和耐冲击时，多用锻件。对于直径大于 400~600mm 的齿轮，常用铸造方法铸造齿坯。为了减少机械加工量，对大尺寸、低精度齿轮，可以直接铸出轮齿；而对小尺寸、形状复杂的齿轮可用精密铸造、压力铸造、粉末冶金、热轧和冷挤等新工艺，制造出具有轮齿的齿坯，以提高劳动生产率，节约原材料。

3.2.2 圆柱齿轮的机械加工工艺过程及工艺分析

1. 圆柱齿轮的加工工艺过程举例

齿轮加工的工艺路线是根据齿轮材质和热处理要求，齿轮结构及尺寸大小、精度要求，生产批量和车间设备条件而定的。通常主要工艺路线可归纳如下：

毛坯制造→毛坯热处理→齿坯加工→检验→齿形加工→齿端加工→齿面热处理→精基准修正→齿形精加工→检验

下面介绍常见的普通精度、成批生产齿轮的典型工艺方案。它采用滚齿（或插齿）、剃齿、珩齿工艺。图 3-9 所示是某齿轮零件图，表 3-6 所示是该齿轮的机械加工工艺过程。

2. 圆柱齿轮的加工工艺过程分析

1) 定位基准选择

齿轮加工的定位基准应尽可能与设计基准相一致，即要符合“基准重合”原则以避免由于基准不重合而产生的误差，同时在齿轮加工整个过程中（如滚、剃、珩等）应选用同一定位基准，以保持基准统一。

(1) 连轴齿轮。连轴齿轮的齿坯、齿形加工与一般轴类零件加工相似，对于直径小的连轴齿轮，一般可采用两端中心孔或锥体作为定位基准；对于直径大的轴齿轮，由于自重和切削力

较大，两端中心孔不适宜作定位基准，而是选用轴颈和一个端面（以端面跳动较小的端平面为宜）作为定位基准。

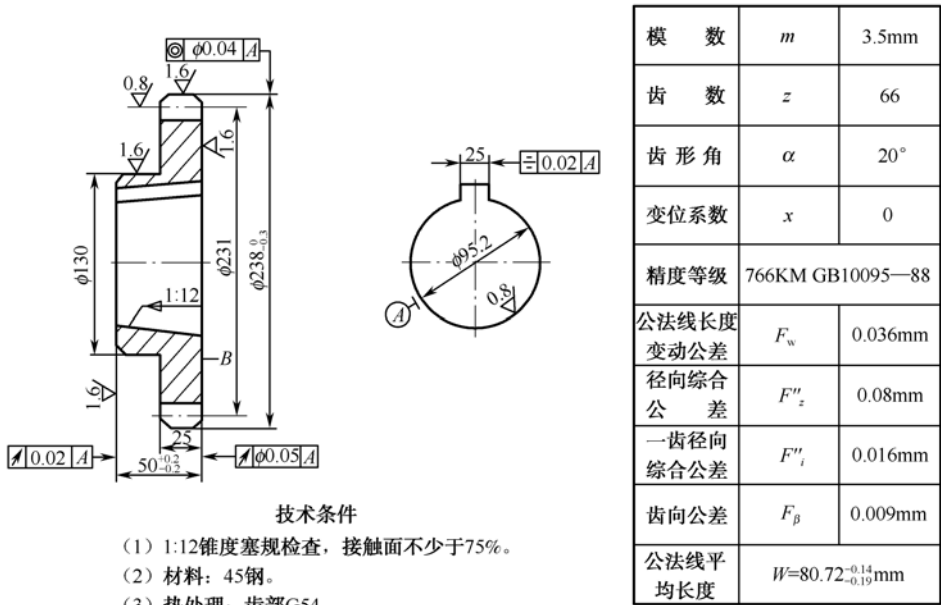


图 3-9 某齿轮简图

表 3-6 某齿轮机械加工工艺过程

序 号	工序内容及要求	定 位 基 准	设 备
1	锻造		
2	正火		
3	粗车各部，均留余量 1.5mm	外圆、端面	转塔车床
4	精车各部，内孔至锥孔塞规划线外露 6~8mm， 其余达图样要求	外圆、内孔、端面	C616
5	滚齿 $F_w = 0.036\text{mm}$ $F_i'' = 0.10\text{mm}$ $f_i'' = 0.022\text{mm}$ $F_\beta = 0.022\text{mm}$ $W = 80.84_{-0.19}^{+0.14}$ 齿面 $Ra = 2.5\mu\text{m}$	内孔、B 端面	Y38
6	倒角	内孔、B 端面	倒角机
7	插键槽达图样要求	外圆、B 端面	插床
8	去毛刺		
9	剃齿	内孔、B 端面	Y5714
10	热处理：齿面淬火后硬度达 HRC50~55		
11	磨内锥孔，磨至锥孔小端面	齿面、B 端面	M220
12	珩齿达图样要求	内孔、B 端面	Y5714
13	终结检验		

(2) 整体带孔齿轮（或装配式齿轮的齿圈）。若以齿坯内孔和端面作为定位基准，则可采用专用心轴，这种方法定位精度高，生产率也高，适用于成批生产。

如果以外圆和端面作为定位基准，则不需要心轴，但要求外圆的径向跳动小。这种方法生产率低，故适用于单件小批生产。

2) 齿坯加工

齿形加工前的齿轮加工称为齿坯加工。齿坯内孔、端面或外圆经常作为定位、测量和装配的基准，所以齿坯的精度对整个齿轮的精度有着重要的影响。另外，齿坯加工在齿轮加工总工时中占有较大的比例，因此必须根据其批量和技术要求等合理选择加工方法。

(1) 齿坯精度。在多数情况下，常以齿轮孔和端面作为齿形加工的定位基准，所以齿坯精度主要是对齿轮孔的尺寸精度、形状精度以及孔和端面的位置精度有较高的要求；当外圆作为测量基准或定位、找正基准时，对齿坯外圆也有较高的要求。具体要求见表 3-7、表 3-8。

表 3-7 齿坯尺寸和形状公差

齿轮精度等级	5	6	7	8
孔的尺寸和形状公差	IT5	IT6	IT7	
轴的尺寸和形状公差	IT5		IT6	
外圆直径尺寸和形状公差	IT7	IT8		

表 3-8 齿坯基准面径向和端面圆跳动公差（μm）

分度圆直径（mm）\ 齿轮精度等级	5 和 6	7 和 8
0~125	11	18
125~400	14	22
400~800	20	32

注：(1) 当齿轮的三个公差组的精度等级不同时，按最高等级确定公差值；
(2) 当外圆不作测齿厚的基准面时，尺寸公差按 IT11 给定，但不大于 0.1mm；
(3) 当以外圆作基准面时，本表就指外圆的径向圆跳动。

(2) 齿坯加工方案的选择。齿坯加工的主要内容包括齿坯的孔加工、端面和中心孔的加工（对于轴类齿轮），以及齿圈外圆和端面的加工。轴类齿轮和套筒齿轮的齿坯，加工过程和一般轴、套类零件基本相同，下面主要讨论盘类齿轮齿坯的加工工艺方案。

齿坯的加工工艺方案主要取决于齿轮的轮体结构和生产类型。

① 大批大量生产的齿坯加工。大批大量加工中等尺寸齿轮齿坯时，多采用“钻—拉—多刀车”的工艺方案：

- 以毛坯外圆及端面定位进行钻孔或扩孔。
 - 拉孔。
 - 以孔定位在多刀半自动车床上粗、精车外圆、端面、车槽及倒角等。
- 由于这种工艺方案采用高效机床组成流水线或自动线，所以生产效率高。

② 成批生产的齿坯加工。成批生产齿坯时，常采用“车—拉—车”的工艺方案：

- 以齿坯外圆或轮毂定位，粗车外圆、端面和内孔。
- 以端面支承拉孔（或花键孔）。
- 以孔定位精车外圆及端面等。

这种方案可由普通车床或转塔车床及拉床实现。其特点是加工质量稳定，生产效率较高。

当齿坯孔有台阶或端面有槽时，可以充分利用转塔车床上的转塔刀架来进行多工位加工，在转塔车床上一次完成全部齿坯加工。

③ 单件小批生产的齿坯加工。单件小批生产齿轮时，一般齿坯的孔、端面及外圆的粗、精加工都在通用车床上经过两次装夹完成，但必须注意将孔和基准端面的精加工在一次装夹内完成，以保证位置精度。

目前齿坯的大量生产正向切削加工自动线和少无切削加工发展。

3. 齿形加工

齿形加工是整个齿轮加工的关键。齿形加工分为无屑加工和切削加工两大类。无屑加工包括热轧、冷轧、冷挤、压铸、注塑和粉末冶金等，无屑加工生产率高，材料消耗少，但受到材料塑性限制，加工精度还不够高。切削加工由于加工精度高，目前仍是齿形加工的主要方法。

齿形切削加工按其加工原理又可分为成型法（仿形法）和展成法（范成法）两种。

成型法加工是采用刀刃形状与被加工齿轮齿槽形状相仿的成型刀具来进行齿形加工，常用的有模数铣刀铣齿、齿轮拉刀拉齿和成型砂轮磨齿等。一般铣齿时，模数小的齿轮用盘状模数铣刀，模数大的齿轮用指状模数铣刀（如图 3-10 所示）。

展成法加工是利用齿轮啮合原理进行的齿形加工，常见的有滚齿、插齿、剃齿、珩齿和磨齿等。这种加工方法的精度和生产率较高，在生产中广泛应用。

齿形加工方法的选择，主要取决于齿轮的精度等级、结构形状、生产类型和齿轮的热处理方法及生产工厂的现有条件，对于不同精度的齿轮，常用的齿形加工方法见表 3-9。

表 3-9 常见齿形的加工方法

齿形加工方法		刀 具	机 床	精度等级	表面粗糙度 $R_a(\mu\text{m})$	适 用 范 围
成型法	成型铣齿	模数铣刀	铣床	9~10	3.2~6.3	用盘状或指状铣刀加工，分度头分齿，加工精度及生产率均较低
	拉齿	齿轮拉刀	拉床	8 或 7	0.8~1.60	精度和生产率较高，但拉刀制造困难，价格高，故仅在大量生产时采用，适宜拉内齿轮
	成型磨齿	砂轮	磨齿机	5~6	0.2~0.80	适用于大批量生产，宜磨削内齿轮和齿数极少的齿轮
展成法	滚齿	齿轮滚刀	滚齿机	6~10	0.8~1.60	最高能达到 4 级，生产率较高，通用性大，常用于加工直齿、斜齿的外口啮合圆柱齿轮和蜗轮
	插齿	插齿刀	插齿机	7~9	0.8~1.60	最高能达到 6 级，生产率较高，通用性大，适用于加工内外啮合齿轮(包括台阶齿轮)，扇形齿轮，齿条等
	剃齿	剃齿刀	剃齿机	5~7	0.8~1.60	生产率高，主要用于齿轮滚、插预加工后、淬火前的齿形精加工
	珩齿	珩齿轮	珩齿机或剃齿机	6~7	0.4~1.60	多用于经过剃齿和高频淬火后的齿形加工，宜于成批生产
	磨齿	砂轮	磨齿机	3~7	0.2~0.80	生产率较低，加工成本较高，用于齿形淬硬后的精密加工，适合单件小批生产

(1) 8级精度以下的齿轮：调质齿轮用滚齿或插齿就能满足要求。对于淬硬齿轮可采用滚（插）齿→剃齿或冷挤→齿端加工→淬火→修正内孔的加工方案。根据不同的热处理方式，在淬火前齿形加工精度应提高一级以上。

(2) 6~7级精度齿轮：对于淬硬齿面的齿轮可采用滚（插）齿→齿端加工→剃齿→表面淬火→校正基准→珩磨（蜗杆砂轮磨齿）的加工方案，加工精度稳定，生产率高，适用于成批量生产。

(3) 5级以上精度的齿轮：一般采用粗滚齿→齿端加工→精滚齿→表面淬火→校正基准→粗磨齿→精磨齿的加工方案。磨齿是目前齿形加工中精度最高、表面粗糙度值最小的加工方法，最高精度可达3~4级。

4. 齿端加工

齿轮的齿端加工方式有倒圆、倒尖、倒棱和去毛刺等。经过倒圆、倒尖和倒棱后的齿轮，形状如图3-11所示。倒圆和倒尖后的齿轮，沿轴向移动时容易进入啮合。倒棱后齿端去掉了锐边，防止了在热处理时因应力集中而产生微裂纹。齿端倒圆应用最多，图3-12所示是指状铣刀倒圆的原理图。倒圆时，高速旋转的铣刀沿圆弧做往复摆动（每加工一个齿往复摆动一次），加工完一个齿后，工件沿径向退出，分度后再接近铣刀，转入下一个齿的倒圆。齿端加工工序应安排在齿形面淬火之前、滚（插）之后进行。

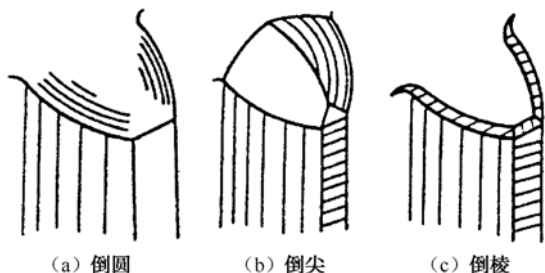


图3-11 法齿端形状

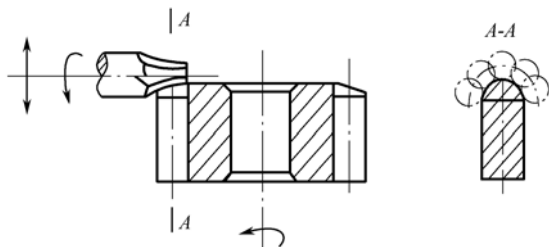


图3-12 指状铣刀倒圆

5. 精基准的修整

齿轮基准孔由于淬火后产生变形，所以必须对基准孔进行修整，以保证齿形精加工的质量。

对于以外径定心的花键孔定位齿轮，通常采用花键推刀修整。对于圆柱形内孔的修整，一般采用推孔或磨孔。推孔生产率高，常用于内孔不淬硬的齿轮。磨孔生产率低而精度高，适用于整体淬火后内孔变形大、硬度高的齿轮，以及内孔较大、厚度较薄的齿轮。磨孔时应以齿轮分度圆定心（如图3-13所示），这样可使磨孔后的齿圈径向跳动量较小，对以后磨齿或珩齿都比较有利。

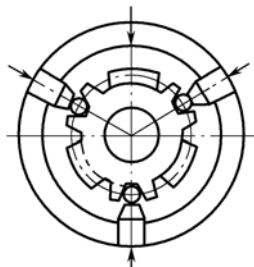


图3-13 磨内孔分度圆定心示意图

3.3 箱体加工

3.3.1 概述

1. 箱体零件的功用和结构特点

箱体零件是各类机器的基础零件之一，它将机器和部件中的轴、套、齿轮等相关零件连接成一个整体，并使之保持正确的相互位置，按规定的传动关系协调地运动。因此，箱体零件的加工质量会直接影响机器的性能、工作精度和使用寿命。

箱体的种类很多，按其功用可分有主轴箱、变速箱、操纵箱、进给箱等，图 3-14 所示为几种箱体零件的结构简图。由图可见，箱体的结构形状一般都比较复杂，壁薄且不均匀，内部呈腔形，在箱壁上既有许多精度较高轴承支承孔和平面需要加工，也有许多精度要求不高的紧固孔需要加工。因此，一般说来，箱体零件不仅需要加工的部位较多，而且加工难度也较大。

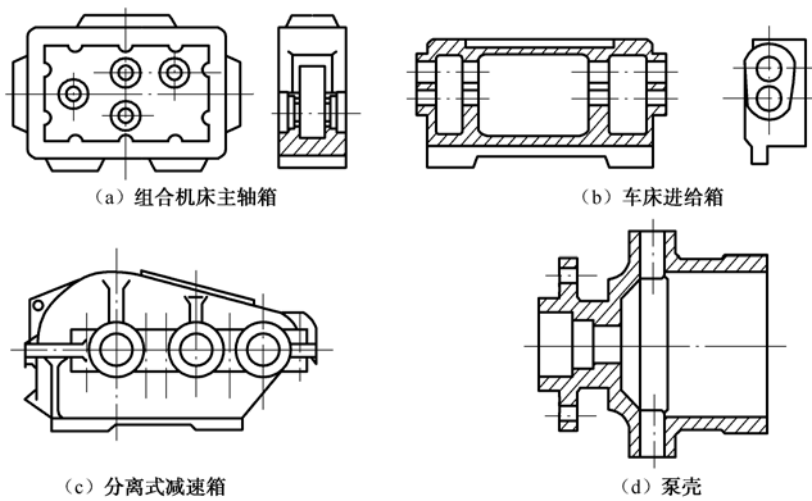


图 3-14 几种箱体的机构简图

2. 箱体零件的主要技术要求

箱体零件的技术要求是根据其用途、工作条件等因素制订的，对于不同行业（如汽拖、航海、航空、机床、起重等），所用的箱体要求是不同的。下面以图 3-15 所示某机床主轴箱为例进行归纳总结。

(1) 孔径精度：孔径的尺寸误差和几何形状误差会造成轴承与孔的配合不良。若孔径过大、配合过松，会使主轴回转轴线不稳定，并降低支承刚度，易产生振动和噪声；若孔径过小，会使配合过紧，轴承将因内外环变形而不能正常运转，缩短使用寿命。若轴承孔不圆，也会使轴承外环变形而引起主轴径向跳动。因此，对孔的精度要求较高，主轴孔的尺寸公差等级为 IT6，

其余孔为 IT6~8。孔的形状精度未做规定，一般控制在尺寸公差范围内即可。

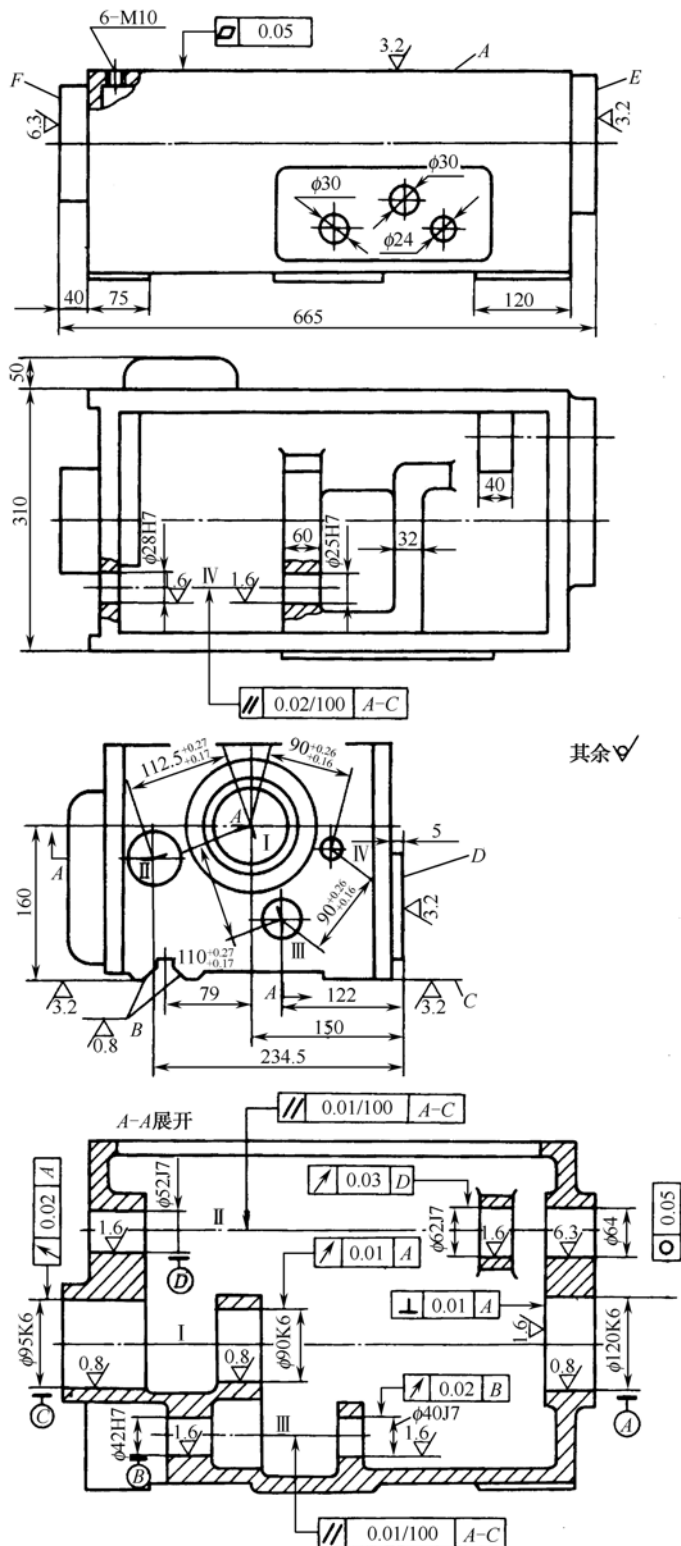


图 3-15 某车床主轴箱简图

(2) 孔与孔的相互位置精度: 同一轴线上各孔的同轴度误差, 会使轴和轴承装配到箱体内出现歪斜, 从而造成主轴径向圆跳动和轴向圆跳动, 又加剧了轴承磨损。所以主轴轴承孔的同轴度为 0.012mm , 其他支承孔的同轴度为 0.02mm 。孔系之间的平行度误差会影响齿轮的啮合质量, 因此, 各支承孔轴心线平行度为 $0.04\sim 0.05\text{mm}/300\text{mm}$ 。孔中心距之差为 $\pm 0.05\sim 0.07\text{mm}$ 。

(3) 孔与平面的相互位置精度: 一般都规定主轴孔和主轴箱安装基面的平行度要求, 它们决定了主轴与床身导轨的相互位置关系, 这项精度是在总装时通过刮研来达到的。为了减少刮研工作量, 一般规定在垂直和水平两个方向上, 只允许主轴前端向上和向前偏。

(4) 主要平面的精度: 装配基面的平面度影响主轴箱与床身连接时的接触刚度, 并且加工过程中常作为定位基面则会影响主要孔的加工精度。因此, 规定底面和导向面必须平直, 用涂色法检查接触面积或单位面积上的接触点数来衡量平面度的高低。顶面的平面度要求是为了保证箱盖的密封性, 防止工作时润滑油泄出。当大批大量生产将其顶面用做定位基面加工孔时, 对它的平面度要求更高。

(5) 表面粗糙度: 主轴孔和主要平面的表面粗糙度会影响连接面的配合性质或接触刚度。一般主轴孔表面粗糙度 R_a 值为 $0.4\mu\text{m}$, 其他各纵向孔表面粗糙度 R_a 值为 $1.6\mu\text{m}$, 孔的内端面表面粗糙度 R_a 值为 $3.2\mu\text{m}$ 。装配基准面和定位基准表面粗糙度 R_a 值为 $0.63\sim 2.5\mu\text{m}$, 其他平面的表面粗糙度 R_a 值为 $2.5\sim 10\mu\text{m}$ 。

3. 箱体材料及毛坯

一般箱体材料常选用 HT200~400 灰铸铁, 因为灰铸铁具有较好的耐磨性、减振性和良好的铸造性, 而且成本又低。坐标镗床的主轴箱用耐磨合金铸铁, 有时某些负荷较大的箱体采用铸钢件。也有些简易箱体和单件、小批生产的箱体为了缩短毛坯制造的周期, 采用钢板焊接结构。在某些特定条件下, 为了减轻重量, 可采用铝镁合金或其他铝合金制作箱体毛坯, 如航空发动机箱体等。

箱体毛坯一般是铸铁, 因为采用铸造方法容易得到复杂的形状、内腔和必要的加强筋、凸边、凸台等。铸造毛坯应视生产批量而定, 在单件小批生产时, 采用木模手工造型, 毛坯的精度低、加工余量大, 其平面余量为 $7\sim 12\text{mm}$, 孔在半径上的余量为 $8\sim 14\text{mm}$; 大批大量生产时, 采用金属模机器造型, 毛坯精度较高, 加工余量小, 其平面余量为 $5\sim 10\text{mm}$, 孔在半径上的余量为 $7\sim 12\text{mm}$ 。成批生产直径大于 $\phi 30\text{mm}$ 的孔和单件小批生产直径大于 $\phi 50\text{mm}$ 的孔一般都在毛坯上预先铸出底孔, 以减少加工余量。

3.3.2 箱体零件的结构工艺性

箱体上的孔分为通孔、阶梯孔、盲孔、交叉孔等。通孔的工艺性最好, 通孔中又以孔的长度 L 与孔径 D 之比 $L/D \leq 1\sim 1.5$ 的短圆柱孔工艺性为最好; 当 $L/D > 5$ 时, 称为深孔, 若深孔精度要求较高、表面粗糙度值要求较小, 加工就比较困难。阶梯孔的工艺性较差, 孔径相差越大, 最小孔径越小, 工艺性就越差。相贯通的交叉孔工艺性也较差, 如图 3-16 (a) 所示, $\phi 100$ 和 $\phi 70$ 两孔相交, 在加工主轴孔时, 刀具走到贯通部分, 由于受径向力不等, 会造成孔轴线的偏斜。如图 3-16 (b) 所示, 工艺上可以将 $\phi 70\text{mm}$ 孔预先不铸通, 加工 $\phi 100$ 孔后再加工 $\phi 70\text{mm}$ 孔, 这样就比较容易保证主轴孔加工质量。盲孔的工艺性最差, 因为精镗或精铰盲孔时, 要用手动送进, 或采用特殊工具送进才行, 故应尽量避免。

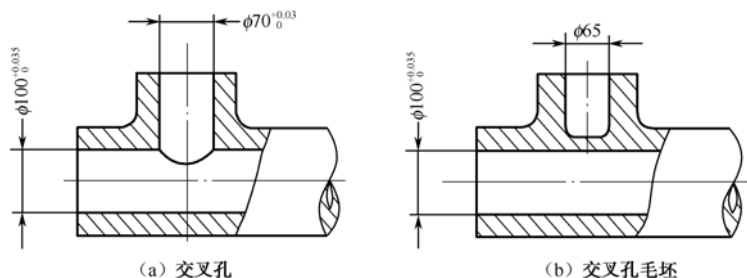


图 3-16 相贯通的交叉孔的工艺性

箱体同轴线上的孔径排列方式有三种,如图 3-17 所示。图 3-17 (a) 所示为孔径大小向一个方面递减,且相邻孔径之差大于孔的毛坯加工余量,这种排列方式便于镗杆和刀具从一端伸入同时加工同轴线上各孔,对单件的中小批生产具有较好的结构工艺性。图 3-17 (b) 所示为孔径大小从两边向中间递减,便于采用组合机床从两边同时加工,使镗杆的悬伸长度大大缩短,提高了镗杆刚度,对大批大量生产具有较好的结构工艺性。图 3-17 (c) 所示为孔径大小不规则排列,工艺性最差,应尽量避免。

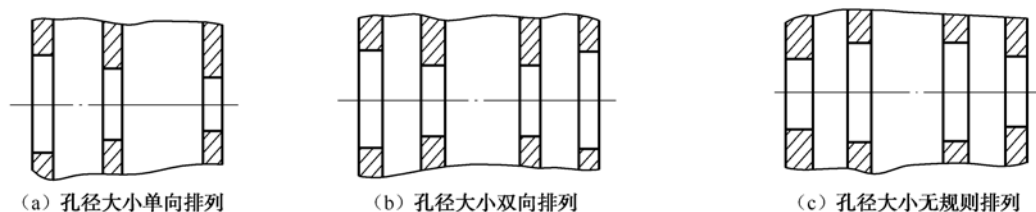


图 3-17 同轴线上孔径的排列方式

箱体的内端面加工比较困难,结构上必须要求加工时尽可能使内端面直径小于刀具穿过的孔加工之前的直径,如图 3-18 (a) 所示,这样可以避免损伤另外的孔。若如图 3-18 (b) 所示,加工时需将镗杆伸进箱体后才能装刀,镗杆退出前又需先将刀片卸下,加工很不方便。当内端面尺寸过大时,还需采用专用径向进给装置。

箱体的外端面凸台应尽可能位于同一平面上,如图 3-19 (a) 所示,以便于在一次走刀中加工出来。若采用图 3-19 (b) 所示形式,加工就要麻烦一些。

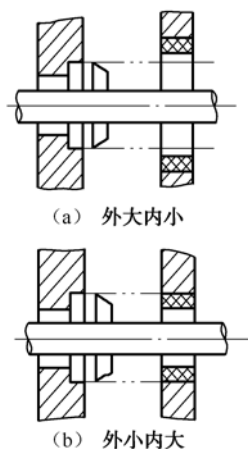


图 3-18 孔内端面的结构工艺性

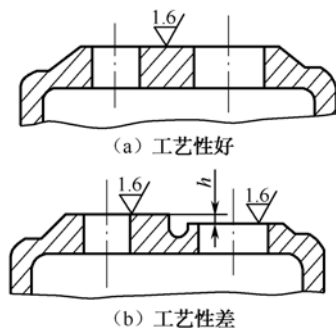


图 3-19 孔外端面的结构工艺性

此外，箱体装配基面应尽可能大，形状应力求简单，以利于加工、装配和检验。箱体上紧固孔的尺寸规格应尽可能一致，以减少加工中换刀的次数。

3.3.3 箱体零件机械加工工艺过程分析

1. 箱体零件机械加工工艺过程

箱体零件的结构复杂，要加工的部位多，依其批量大小和各厂的实际条件，其加工方法是不同的。表 3-10 所示为某车床主轴箱（图 3-15）小批生产加工工艺过程；表 3-11 所示为大批生产工艺过程。

表 3-10 某主轴箱小批生产工艺过程

序 号	工 序 内 容	定 位 基 准
1	铸造	
2	时效	
3	漆底漆	
4	画线：考虑主轴孔有加工余量，并尽量均匀，画 C、A 及 E、D 面加工线	
5	粗、精加工顶面 A	画线找正
6	粗、精加工 B、C 面及侧面 D	顶面 A 并校正主轴线
7	粗、精加工两端面 E、F	B、C 面
8	粗、半精加工各纵向孔	B、C 面
9	精加工各纵向孔	B、C 面
10	粗、精加工横向孔	B、C 面
11	加工螺孔及各次要孔	
12	清洗、去毛刺	
13	检验	

表 3-11 某主轴箱大批生产工艺过程

序 号	工 序 内 容	定 位 基 准
1	铸造	
2	时效	
3	漆底漆	
4	铣顶面 A	I 孔与Ⅱ孔
5	钻、扩、铰 2- $\phi 8H7mm$ 工艺孔（将 6-M10mm 先钻至 $\phi 7.8mm$ 。铰 2- $\phi 8H7mm$ ）	顶面 A 及外形
6	铣两端面 E、F 及前面 D	顶面 A 及两工艺孔
7	铣导轨面 B、C	顶面 A 及两工艺孔
8	磨顶面 A	导轨面 B、C
9	粗镗各纵向孔	顶面 A 及两工艺孔
10	精镗各纵向孔	顶面 A 及两工艺孔

续表

序 号	工 序 内 容	定 位 基 准
11	精镗主轴孔 I	顶面 A 及两工艺孔
12	加工横向孔及各面上的次要孔	
13	磨 B、C 导轨面及前面 D	顶面 A 及两工艺孔
14	将 2- $\phi 8H7mm$ 及 4- $\phi 7.8mm$ 均扩钻至 $\phi 8.5mm$, 攻 6-M10mm 螺纹	
15	清洗、去毛刺倒角	
16	检验	

2. 箱体类零件机械加工工艺过程分析

从表 3-10、表 3-11 所示箱体加工工艺过程可以看出，不同批量箱体加工的工艺过程既有共性，也有特性。

1) 拟定箱体工艺的共同性原则

(1) “先面后孔”的加工原则。先加工平面，后加工孔，这也是箱体加工的一般规律。因为箱体的孔的精度要求高，加工难度大，先以孔为粗基准加工平面，再以平面为精基准加工孔，不仅为孔的加工提供了稳定可靠的精基准，同时可以使孔的加工余量较为均匀。并且，由于箱体上的孔大都分布在箱体的各平面上，先加工好平面，去除了铸件表面的凹凸不平 and 夹砂等缺陷，钻孔时可减少钻头引偏；扩孔或铰孔时，可防止刀具崩刃；同时，对刀也比较方便。如表 3-10 所示，5~7 工序加工平面后，才开始加工孔。

(2) 粗、精加工阶段分开进行。箱体的结构复杂、壁厚不均，刚性不好，而主要表面的加工精度要求又高，因此箱体重要加工表面的加工都要划分为粗、精两个加工阶段，这样可以消除粗加工所产生的内应力、切削力、夹紧力和切削热等对加工精度的影响，有利于保证箱体的加工精度。粗、精分开还可以及时发现毛坯的缺陷，避免更大的浪费。同时，还能根据粗、精加工的不同要求合理选用设备，有利于延长高精度设备的使用寿命，提高经济效益。如表 3-11 所示，顶面 A 的加工，4 工序为粗加工，8 工序为精加工。

应该指出，随着粗、精加工的分开进行，机床与夹具的需要数量及工件的安装次数相应增加，对单件小批生产的箱体或大型箱体的加工，工件在车间来回转送费时费力，往往会使制造成本增加。在这种情况下，常常又将粗、精加工合并在一道工序内完成，但从工步上讲，粗、精加工还是分开的，如粗加工后将工件松开一点，再用较小的夹紧力夹紧工件，使工件因夹紧力而产生的弹性变形在精加工之前得以恢复。例如，导轨磨床磨床头箱导轨时，粗磨后进行充分冷却，残余应力释放后再进行精磨。

(3) 合理安排热处理工序。如前所述，箱体结构复杂，壁厚不均匀，铸造残余应力较大。为了消除残余应力以保证其机械加工后精度的稳定性，铸造之后安排一次人工时效处理。床头箱零件人工时效的规范为：加热到 500~550℃，保温 4~6h，冷却速度小于或等于 30℃/h，出炉时温度小于或等于 200℃。

对于普通精度的箱体，一般在铸造之后安排一次人工时效处理。对于一些高精度的箱体或形状特别复杂的箱体，在粗加工之后还要安排一次人工时效处理，以消除粗加工所造成的残余应力，进一步提高箱体加工精度的稳定性。对有些精度要求不高的箱体毛坯，有时不安排时效处理，而是利用粗、精加工工序间的停放和运输时间，使之进行自然时效。

箱体人工时效，除用加热保温方法外，也可采用振动时效来消除残余应力。

(4) 一般都用箱体上重要孔作为粗基准, 如床头箱都用主轴孔作为粗基准。

2) 定位基准的选择

由于批量不同, 箱体生产定位基准选择和所用设备也大不相同。

(1) 精基准的选择。箱体零件加工精基准选择也与生产批量大小有关。

① 单件小批生产用装配基准作为定位基准。图 3-15 所示车床床头箱单件小批加工孔系时, 选择箱体底面导轨 *B*、*C* 面作为定位基准。*B*、*C* 面既是床头箱的装配基准, 又是主轴孔的设计基准, 并与箱体的两端面、侧面以及各主要纵向轴承孔在相互位置上有直接联系, 以它作为统一的定位基准加工上述表面时, 不仅消除了基准不重合误差, 有利于保证各表面间的相互位置精度, 而且在加工各孔时, 箱口朝上, 便于安装调整刀具、更换导向套、测量孔径尺寸、观察加工情况和加注切削液等。

但是这种定位方式也有它的不足之处。当加工箱体中间壁上的孔时, 为了提高刀具系统的刚度, 应当在箱体内部相应的部位设置刀杆的支承、导向支承。由于箱体内部是封闭的, 中间支承只能用如图 3-20 所示的吊架从箱体顶面的开口处伸入箱体内, 每加工一件装卸一次。吊架与镗模之间虽有定位销定位, 但这种悬挂的吊架刚性差, 制造安装精度较低, 经常装卸容易产生误差, 且使加工的辅助时间增加, 影响生产率的提高, 所以这种定位方式只适用于单件小批生产。

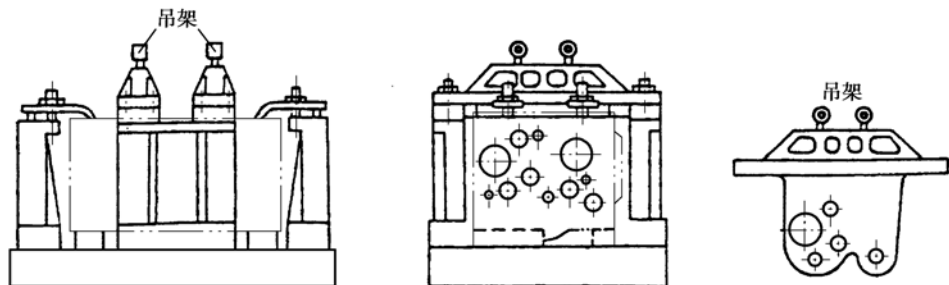


图 3-20 吊架式镗模夹具

② 大批量生产常采用顶面及两定位销孔 (一面两孔) 作为定位基准, 如图 3-21 所示。

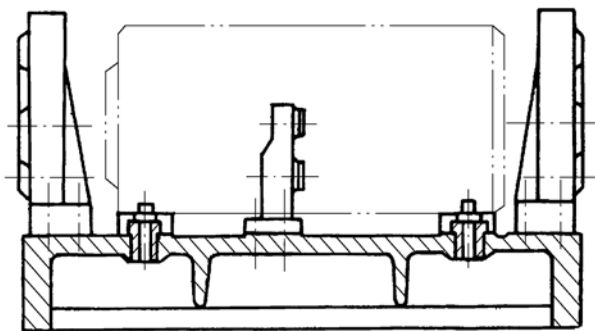


图 3-21 用箱体顶面及两销定位的镗模

这种定位方式加工时箱体口朝下, 中间导向支承架可以紧固在夹具体上 (固定支架), 提高了夹具刚度, 有利于保证各支承孔加工的位置精度, 而且工作装卸方便, 减少了辅助工时, 提高了生产效率。

这种定位方式也有其不足之处。由于主轴箱顶面不是设计基准, 所以定位基准与设计基准

不重合,出现基准不重合误差,使得定位误差增加。为了克服这一缺点,以保证箱体主轴孔的加工精度,一方面应进行工艺尺寸换算;另一方面工艺上必须采取措施,以提高作为定位基准的箱体顶面和两定位销孔的加工精度,这样就增加了箱体加工的工作量。另外,由于箱体口朝下,加工时不便于观察各表面加工的情况,所以不能及时发现毛坯是否有砂眼、气孔等缺陷,而且加工中不便于测量和调刀。因此,用箱体顶面及两定位销孔作精基准加工时,必须采用定径刀具(如扩孔钻和铰刀等)。

必须特别指出,上述两种方案的对比分析,仅仅是针对类似床头箱零件而言的。在实际生产中,许多其他形式的箱体,采用一面两孔的定位方式,在加工中应用十分广泛,因为这种定位方式很简单地限制了工件六个自由度,定位稳定可靠,在一次安装下,可以加工除定位面以外的所有的五个面上的孔或平面,也可以作为从粗加工到精加工的大部分工序的定位基准,实现“基准统一”;此外,这种定位方式夹紧方便,工件夹紧变形小,易于实现自动定位和自动夹紧。因此,在组合机床或自动线上加工箱体时,多采用这种定位方式。

(2) 粗基准的选择。箱体加工的精基准面确定之后,就要选择机械加工开始工序加工精基准面用的粗基准。箱体粗基准应满足以下几点要求:第一,在保证各加工面均有加工余量的前提下,应使重要孔的加工余量尽量均匀;第二,装入箱体内的旋转零件(如齿轮、轴套等)应与箱体内壁有足够的间隙;第三,注意保持箱体必要的外形尺寸;第四,还应保证定位、夹紧可靠。

为了满足上述要求,一般应选箱体零件的重要孔(如主轴孔)作为粗基准。例如,车床床头箱就是以主轴孔为粗基准来加工精基准平面的。但是随着生产类型不同,实现以主轴孔为粗基准的工件安装方式是不一样的。

中、小批生产时,由于毛坯精度较低,一般采用画线找正安装进行加工,即以画线作为粗基准找正工件。这种方法对工人技术要求高,而且生产率低。其方法如下。

首先将箱体用千斤顶安放在平台上(如图 3-22(a)所示),调整千斤顶,使主轴孔 I 和 A 面与台面基本平行, D 面与台面基本垂直,根据毛坯的主轴孔画出主轴孔的水平轴线 I—I,在四个面上均要画出,作为第一校正线。画此线时,应根据图纸要求,检查所有的加工部件在水平方向上是否均有加工余量,否则应重新调整 I—I 线的位置,做必要的校正,直至所有的加工部位均有加工余量, I—I 线方可最终确定下来。I—I 线确定后,即画出 A 面和 C 面的加工线。然后将箱体翻转 90°, D 面置于三个千斤顶上,调整千斤顶,使 I—I 线与台面垂直(用大角尺在两个方向上校正),根据毛坯的主轴孔并考虑到各加工部位在垂直方向的加工余量,按照上述方法在四个面上画出主轴孔的垂直轴线 II—II 作为第二校正线(如图 3-22(b)所示),依据 II—II 线画出 D 面加工线。再将箱体翻转 90°(如图 3-22(c)所示),将 E 面置于三个千斤顶上,调整千斤顶,用大角尺在两个方向上校正使 I—I 线与 II—II 线均与台面垂直。根据主轴孔凸台高度尺寸,先画出 F 面,然后再画出 E 面加工线。加工箱体平面时,按所画线找正安装工件,这样就体现了以主轴孔为粗基准。

大批大量生产时,毛坯的制造精度较高,可以直接以主轴孔在夹具上定位,如图 3-23 所示采用专用夹具安装,工件安装迅速,生产率高。

3) 设备选用

单件小批生产一般是在通用机床上进行加工的,除个别必须用专用夹具才能保证质量的工序(如孔系加工)外,一般不用专用夹具。而大批量箱体的加工则广泛采用组合加工机床,如多轴龙门铣床、组合磨床等,各主要孔加工采用多工位组合机床、专用镗床等,专用夹具用得

也很多，这就大大提高了生产率。

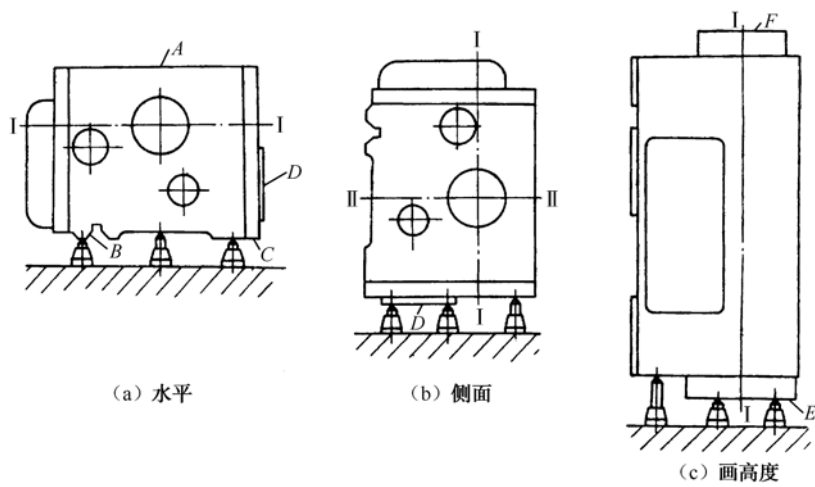
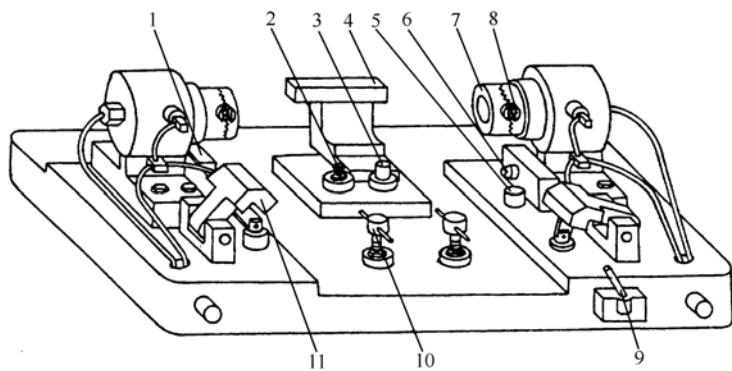


图 3-22 主轴箱的画线

3.3.4 箱体的平面加工

箱体的平面加工方法常用的有刨、铣、拉、磨四种。刨削和铣削常用于平面的粗加工和半精加工，而拉削、磨削则用于平面的精加工。

刨削加工的特点是：刀具结构简单、机床调整方便。在龙门刨床上可以利用几个刀架，在一次装夹中同时或依次完成若干个表面的加工，从而可以经济地保证这些表面间相互位置精度要求。精刨还可以代替刮削，以减轻工作量。精刨后的表面粗糙度值 R_a 可达 $0.63\sim 0.25\mu\text{m}$ ，平面度可达 0.002mm/m 。



1、3、5—支承；2—辅助支承；4—支架；6—挡销；7—短轴；8—活动支柱；9—操纵手柄；10—可调支承；11—夹紧块

图 3-23 以主轴孔为粗基准铣顶面的夹具

铣削生产率高于刨削，在成批生产中多用铣削加工平面，当加工尺寸较大的箱体平面时，常采用多轴龙门铣床，用几把铣刀同时加工几个平面，如图 3-24 所示。这样既能保证平面间相互位置精度，同时又提高了生产率。近年来端铣刀在结构、刀具材料等方面都有很大改进。如果不重磨刃端铣刀，每齿进给量 a_f 可达数毫米，进给量在铣削深度 a_p 较小 (0.3mm) 的情况下可达 6000mm/min ，其生产率比普通精加工端铣刀高 $3\sim 5$ 倍，加工表面的表面粗糙度 R_a 值可达 $1.25\mu\text{m}$ 。

平面磨削的加工质量比刨和铣都高。磨削表面的表面粗糙度 R_a 值可达 $0.32\sim 1.25\mu\text{m}$ 。生产批量较大时,箱体的主要平面常用磨削来精加工。为了提高生产率和保证平面间的相互位置精度,工厂还常采用组合磨削来加工平面,如图 3-25 所示。

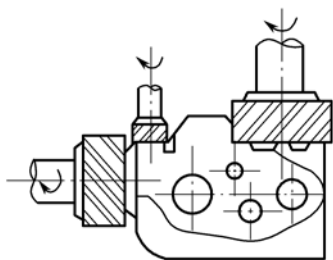


图 3-24 多刀铣削箱体实例

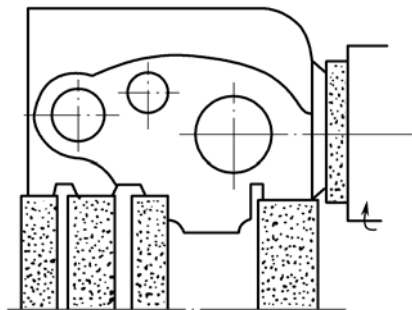
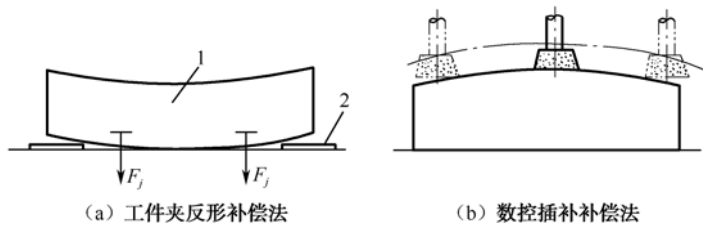


图 3-25 组合磨削

但要指出的是,平面磨削时磨削处的温度比其他加工方法(刨、铣)要高。例如,磨削时箱体上表面因热膨胀产生的弯曲变形而呈中凸,加工时将这层中凸层磨平,加工后加工面冷却而上下温差消失,上表面则因冷缩而下凹,产生直线度及平面度误差,这项误差对于某些尺寸较大的箱体影响很大。要减少此项误差,除了加强磨削时的冷却措施外,还可采用误差补偿的方法,以减少或消除平面加工误差。图 3-26 (a) 所示为某厂采取的补偿措施,在箱体安装面两端垫入薄垫片,中间压紧而使上平面呈中凹,以抵消加工中产生的中凸热变形;图 3-26 (b) 所示为数控导轨磨床补偿法,可直接在磨削加工程序中预先编制一条中凸的插补运动曲线,使上平面两端多磨去一些加工余量,有效地减少或消除了平面加工误差。当然,此方法也适用于床身导轨面的加工。



(a) 工件夹反形补偿法 (b) 数控插补补偿法

1—工件; 2—垫片; F_j —压紧力

图 3-26 减少箱体热变形误差的措施

平面拉削是一种高效率的加工方法,是利用特制的拉刀在拉床上进行的。平面拉刀常制成组合式,拉刀同时工作的刀齿数多、切削刃长,且拉刀的刀齿分粗切齿、精切齿和校准齿。在一次工作行程中就能够完成工件粗、精加工及修光。拉床采用液压系统,传动平稳,拉削速度低,不会产生积屑瘤,因此拉削加工质量好。一般拉削精度可达 IT7~8 级公差,表面粗糙度 R_a 值为 $1.6\sim 0.4\mu\text{m}$ 。

3.3.5 箱体零件的孔系加工

箱体上一系列有相互位置精度要求的孔的组合,称为孔系。孔系可分为平行孔系、同轴孔系和交叉孔系,如图 3-27 所示。

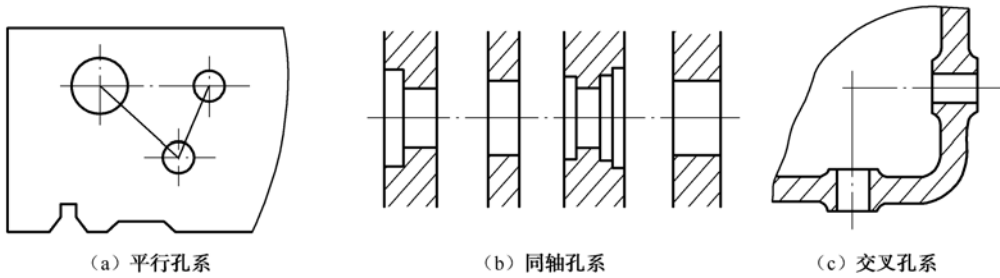


图 3-27 孔系分类

孔系加工是箱体加工的关键。根据箱体批量的不同和孔系精度要求的不同，孔系的加工所用的加工方法也不同。

1. 平行孔系的加工

所谓平行孔系，是指一系列的轴线互相平行且有孔距精度要求的孔组成的孔系。下面主要介绍保证平行孔系孔距精度的方法。

1) 找正法

找正法是指工人在通用机床（如镗床、铣床）上利用辅助工具来找正要加工孔的正确位置的加工方法。找正法加工效率低，一般只适用于单件小批生产。根据找正方法的不同，找正法又可分为以下几种。

（1）画线找正法。加工前按照零件图在箱体毛坯上画出各孔的加工位置线，然后按画线加工。画线找正花费时间长，生产率低，而且加工出的孔距精度也较低，一般为 0.5~1mm。为提高画线找正的精度，加工中往往需要结合试切法同时进行，即先按画线找正镗出一孔，再按线将机床主轴调到第二孔中心，试镗出一个比图样要求小的孔，测量两孔的实际孔心距，若不符合图样要求，则根据测量结果重新调整主轴的位置，再进行镗孔、测量、调整，如此反复几次，直至孔距尺寸达到符合的要求为止，如图 3-28 所示。

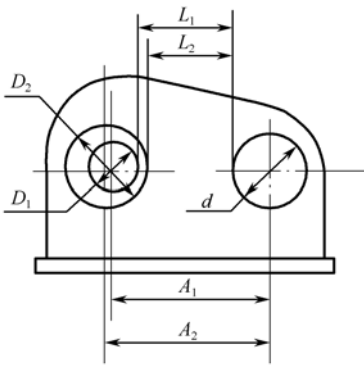


图 3-28 试镗法

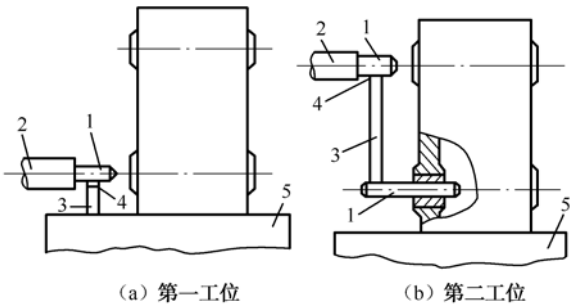
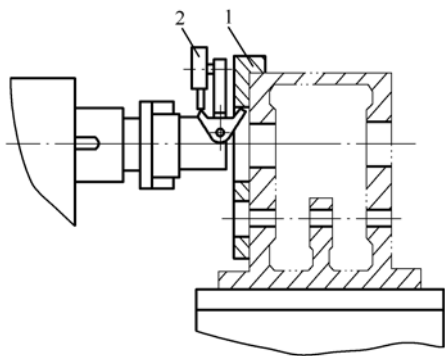


图 3-29 用心轴和块规找正

（2）心轴、块规找正法。如图 3-29 所示，镗第一排孔时将心轴插入机床主轴孔内，然后根据孔和定位基准的距离组合一定尺寸的块规来校正机床主轴位置，校正时用塞尺测定块规与心轴之间的间隙，以避免块规与心轴直接接触而损伤块规（如图 3-29（a）所示）。镗第二排孔时，分别在机床主轴和已加工孔中插入心轴，采用上述同样方法来校正机床主轴的位置，以

保证孔心距的精度(如图3-29(b)所示)。这种找正法可达到较高的孔距精度($\pm 0.03\text{mm}$),但生产效率还是较低,只适用于单件小批生产。

(3) 样板找正法。如图3-30所示,将工件上孔系关系复制在10~20mm厚的钢板制成的样板上。样板上孔系的孔距精度比工件孔系的孔距高(一般为 $\pm 0.01\sim 0.03\text{mm}$),孔径比工件的孔径大,以便于镗杆通过;孔的直径精度无须严格要求,但要有较高的几何形状精度和较小的表面粗糙度值,以便于找正。使用时,将样板1装在垂直于被加工孔系的箱体端面上(或固定于机床工作台上),利用装在机床主轴上的百分表找正器2,按样板上的孔找正机床主轴的位置进行加工。用这种方法加工孔系不易出差错,找正方便迅速,孔距精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$,工艺装备也不太复杂,



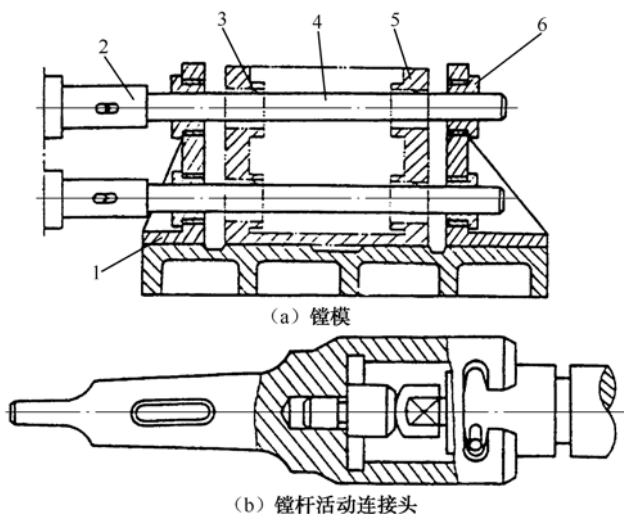
1—样板; 2—百分尺

图 3-30 样板找正法

且成本低,仅为镗模成本的 $\frac{1}{9}\sim\frac{1}{7}$,单件小批的大型箱体的孔系加工常用此法。

2) 镗模法

用镗模加工孔系,如图3-31(a)所示。工件装夹在镗模上,镗杆被支承在镗模的导套里,增加了系统刚性。这样,镗刀通过模板上的孔将工件上相应的孔加工出来。当用两个或两个以上的支承来引导镗杆时,镗杆与机床主轴必须浮动连接,图3-31(b)所示为常用的一种镗杆活动连接形式,采用浮动连接时,机床主轴回转精度对孔系加工精度影响很小,因而可以在精度较低的机床上加工出精度较高的平行孔系。加工的孔距精度主要取决于镗模精度。当从一端加工且镗杆两端均有导向支承时,孔与孔之间的同轴度和平行度可达 $0.02\sim 0.03\text{mm}$;当分别从两端加工时,可达 $0.04\sim 0.05\text{mm}$ 。



1—镗模; 2—活动接头; 3—镗刀; 4—镗杆; 5—工件; 6—镗杆导套

图 3-31 用镗模加工孔系

3) 坐标法

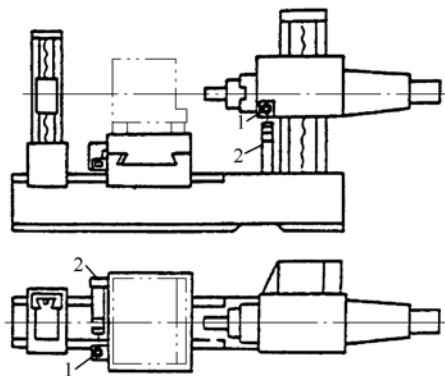
坐标法镗孔是在普通卧式镗床、坐标镗床或数控铣床设备上,按孔系的坐标尺寸,借助测量装置来调整机床主轴在水平和垂直方向上的相对位置,以保证孔心距精度的一种镗孔的方法。

在箱体设计图纸上,平行孔系的孔心距尺寸有严格的公差要求。采用坐标法镗孔之前,必须把各孔心距尺寸及公差换算成以主轴孔中心为原点的相互垂直的坐标尺寸及公差。借助三角几何关系及工艺尺寸链规律即可算出。目前许多工厂编制了主轴箱传动轴坐标设计计算程序,用微机很快即可完成该项工作。

坐标法镗孔的孔心距精度取决于坐标的移动精度,也就是取决于坐标测量装置的精度。这类坐标测量装置的形式很多,主要有以下几种。

(1) 普通刻线尺与游标尺加放大镜测量装置:其位置精度为 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ 。

(2) 百分表与块规测量装置:如图 3-32 所示,该装置一般与普通刻线尺配合使用,即普通镗床上用百分表 1 和块规 2 来调整主轴垂直和水平坐标位置。百分表分别装在镗床头架和横向工作台上,位置精度可达 $\pm 0.02\sim 0.04\text{mm}$ 。这种装置调整起来难度大,费时费事,生产效率低,适用于单件小批生产。



1—百分表; 2—块规

图 3-32 在普通镗床用坐标法加工孔系

(3) 经济刻线与光学读数头测量装置:这是用得最多的一种测量装置,该装置精度较高,且操作方便,经济刻线尺任意两刻线间误差不超过 $5\mu\text{m}$,光学读数头的读数精度为 0.01mm 。

(4) 光栅数字显示装置和感应同步器测量装置:该装置读数精度高,为 $0.0025\sim 0.01\text{mm}$ 。我国卧式镗床 T610 上已采用该装置。

(5) 高精度测量装置:高精度线位移测量系统有精密丝杠、线纹尺、光栅、感应同步器、磁尺、码尺和激光干涉仪。高精度转台可以实现极坐标加工。转台分光学转台与机械转台两种,光学转台的转位精度为 $1''\sim 8''$,机械转台为 $10''$ 左右。我国生产的 T4163A 单柱坐标镗床工作台由影屏定位,定位元件采用特殊合金制成的槽形精密刻线尺,机床读数精度为 0.001mm ,定位精度为 0.004mm 。

采用坐标法加工孔系时,要特别注意选择基准孔和镗孔顺序;否则,坐标尺寸的累积误差会影响孔距精度。基准孔应尽量选择本身尺寸精度高、表面粗糙度值小的孔(一般为主轴孔),这样在加工过程中,便于校验其坐标尺寸。有孔距精度要求的两孔应连在一起加工;加工时,应尽量使工作台朝同一方向移动,以减小传动元件反向间隙对坐标精度的影响。

2. 同轴孔系的加工

成批生产中,箱体同轴孔系的同轴度几乎都有镗模保证。单件小批生产中,其同轴度用如下几种方法来保证。

(1) 利用已加工孔作为支承导向。如图 3-33 所示,当箱体前壁上的孔加工好后,在孔内装一导向套,支承和导引镗杆加工后壁上的孔,以保证两孔同轴度要求,这种方法只适用于加工离箱壁较近的孔。

(2) 利用镗床后立柱上导向套支承。这种方法由镗杆系两端支承,刚性好,但此法调整麻烦,镗杆要长,很笨重,故只适用于大型箱体加工。

(3) 采用调头镗法。当箱体箱壁相距较远时,宜采用调头镗法。在工件一次安装下,镗好箱体一端孔后,将镗床工作台回转 180° ,再加工箱体另一端的同轴线孔。调头镗不用夹具和长刀杆,但需要调整工作台的回转误差和调头后主轴应处的正确位置,调头镗的调整方法如下。

利用箱体上的工艺基面,用百分表对此平面进行找正(如图 3-34(a)所示),使它和镗杆轴线平行,校正后加工孔, B 孔加工后,再回转工作台,并用镗杆上装的百分表沿此平面重新校正,以保证工作台准确地回转 180° (如图 3-59(b)所示),然后再加工 A 孔,就可保证 A、B 两孔同轴。

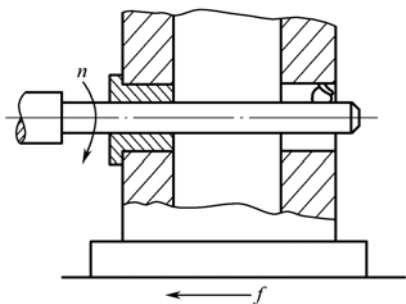


图 3-33 利用已加工孔导向

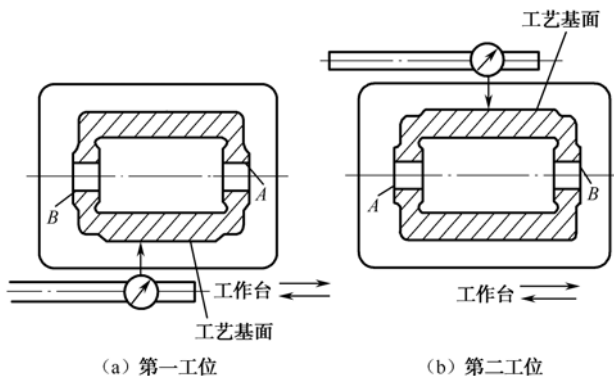


图 3-34 调头镗时工件的校正

若箱体上没有长的、加工好的工艺基面,也可将直尺置于工作台上,借助直尺使其表面与待加工的孔轴线平行后再固定。调整方法同上,也可达到两孔同轴的目的。

3. 交叉孔系的加工

交叉孔系的主要技术 requirements 是控制有关孔的垂直度,在普通卧式铣床上主要靠机床工作台上的 90° 对准装置。目前国内有些镗床,如 TM617,采用了端面齿定位装置, 90° 定位精度达 $5''$,还有的用了光学瞄准器。

当有些镗床工作台 90° 分度定位精度很低时,可在加工好的孔中插入心棒,工作台转位 90° ,用百分表找正以提高其定位精度(转动工作台),如图 3-35 所示。

4. 箱体孔系加工自动化

随着科学技术的不断发展,出现了各种各样的自动化加工设备和手段。对于不同类型孔系的箱体零件,自动化加工的方法和设备是不同的,如自动机床、自动生产线等。

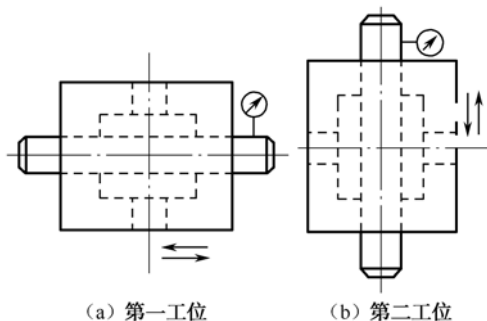
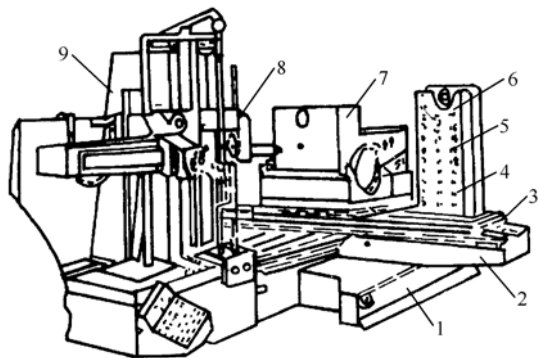


图 3-35 找正法加工交叉孔系

箱体零件的自动化加工可在数控机床上或自动线的组合机床上进行。数控机床适合中、小批量生产，自动线则适合大批量生产。

加工中心是自动化程度更高的机床，如图 3-36 所示。用加工中心来加工箱体，可在一次装夹中加工出所有表面，实现连续多面、多工序加工，精度和效率更高，在单件小批量生产中更能显示其适应性和灵活性。但由于价格昂贵，目前使用不够广泛。

采用自动化加工可减轻工人劳动强度，减少操作人员，大大提高劳动生产率，保证加工质量稳定，减少设备占地面积和降低产品成本。



1—床身；2—下工作台；3—工作台；4—工具；5—工具存放孔；6—刀库；7—工件；8—滑鞍；9—立柱

图 3-36 卧式加工中心

习题 3

- 3-1. 主轴加工中，为什么常以中心孔作为定位基准？试分析中心孔对加工质量的影响。
- 3-2. 试编制图 3-37 所示的台阶轴机械加工工艺过程。生产类型属于小批生产，材料为 40Cr。
- 3-3. 箱体孔系加工有哪些方法？它们各有什么特点？
- 3-4. 精密箱体零件的工艺过程制订应遵循什么原则？为什么？
- 3-5. 试举例说明齿轮的设计基准、定位基准、测量基准、装配基准。试分析影响齿形误差的因素是什么。
- 3-6. 齿轮的典型加工工艺过程由哪几个加工阶段所组成？其中，毛坯热处理与齿面热处理各起什么作用？应安排在工艺过程的哪一阶段？

第4章

机械加工精度

机械产品质量取决于机械加工质量和装配质量，而零件机械加工质量又主要包括加工精度和加工表面质量两个方面，即零件机械加工质量既与零件本身材料性能有关，也与加工精度、表面粗糙度等几何因素及表层组织状态等物理因素有关。机械产品加工的首要任务就是保证零件的机械加工质量要求。

机械加工质量包括几何参数方面的质量和表面物理机械参数方面的质量。其中，几何参数方面的尺寸精度、宏观几何精度和位置精度属于机械加工精度范畴，而表面物理机械参数方面的质量和微观几何形状精度属于机械加工表面质量范畴。

本章主要研究机械加工精度问题。

4.1 概述

4.1.1 机械加工精度的概念

零件的加工精度是指零件加工后的实际几何参数（尺寸、形状和相互位置）与理想零件几何参数的符合程度。符合程度越高，加工精度就越高；符合程度越低，加工精度就越低。所谓理想零件，对表面形状而言，就是绝对准确的圆柱面、平面、锥面等；对表面位置而言，就是绝对的平行、垂直、同轴和一定角度等；对于尺寸而言，就是零件尺寸的公差带中心。

零件的加工精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度三个方面。尺寸精度是指机械加工后零件的直径、长度和表面间距离等尺寸的实际值与理想值的接近程度。形状精度是指机械加工后零件的实际几何形状与理想形状的接近程度。位置精度是指机械加工后零件的实际几何位置与理想位置的接近程度。

加工过程中有很多因素影响加工精度。实际加工不可能把零件做得与理想零件完全一致，总会产生大小不同的偏差。从保证产品的使用性能分析，也没有必要把每个零件都加工得绝对精确，而只要求它在某一规定的范围内变动，这个允许变动的范围就是公差。制造者的任务就是要使加工误差小于图样上规定的公差。

由于生产中加工精度的高低是用加工误差的大小来表示的，所以保证和提高加工精度的问题，实际上就是控制和减少加工误差的问题。加工误差是指零件加工后的实际几何参数（尺寸、形状和相互位置）对理想几何参数的偏离量。加工误差的大小反映了加工精度的高低。换言之，加工误差越小，加工精度越高；反之，则加工精度越低。

4.1.2 加工精度的获得方法

1. 尺寸精度的获得方法

1) 试切法

操作工人在每一工步或走刀前进行对刀，然后切出一小段，测量其尺寸是否合适，如果不合适，将刀具的位置进行调整，再试切一小段，直至达到尺寸要求后才加工这一尺寸的全部表面，即试切—测量一再试切直至测量结果达到图纸给定要求的方法。试切法的加工效率低、劳动强度大，且要求操作者有较高的技术水平，否则质量不易保证，主要适用于单件小批量生产。

2) 定尺寸刀具法

这是用刀具的相应尺寸来保证工件被加工部位尺寸的加工方法，如钻孔、铰孔、拉孔、攻螺纹、用镗刀块加工内孔、用组合铣刀铣工件两侧面和槽面等就是这样。这种方法的加工精度主要取决于刀具的制造、刃磨质量和切削用量等，其生产率较高，刀具制造较复杂，常用于孔、槽和成型表面的加工。

3) 调整法

调整法是指预先调整好刀具和工件在机床上的相对位置，并在一批零件的加工过程中保持此位置不变，以保持被加工零件尺寸的加工方法。调整法广泛采用行程挡块、行程开关、靠模、凸轮或夹具等来保证加工精度。这种方法加工效率高，加工精度稳定可靠，无须操作工人有很高的技术水平，且劳动强度较小，广泛应用于成批、大量和自动化生产中。

4) 自动控制法

在加工过程中，通过由尺寸测量装置、动力进给装置和控制机构等组成的自动控制系统，自动完成工件尺寸的测量、刀具的补偿调整和切削加工等一系列动作，当工件达到要求的尺寸时，发出指令停止进给和此次加工，从而自动获得所要求尺寸精度的一种加工方法。例如，数控机床就是通过数控装置、测量装置及伺服驱动机构来控制刀具或工作台按设定的规律运动，从而保证零件加工的尺寸等精度。

2. 形状精度的获得方法

1) 轨迹法

轨迹法是利用刀具的运动轨迹来形成要求的表面几何形状。刀尖的运动轨迹取决于刀具与工件的相对运动（成型运动）。例如，刨刀的直线运动和工件垂直于刀具运动方向的间断直线运动形成平面；工件的回转运动和车刀的直线运动可以形成圆柱面或圆锥面；工件的回转运动和车刀沿靠模所做的曲线运动可以形成特殊形状的回转表面等。用这种方法得到的形状精度取决于刀具与工件成型运动的精度。

2) 成型法

成型法是利用成型刀具代替普通刀具来获得要求的几何形状的表面。机床的某些成型运动被成型刀具的刀刃所取代，从而简化了机床的结构，提高了劳动生产效率。例如，用成型车刀加工曲面，用成型铣刀铣削成型表面，等等。用这种方法获得的表面形状精度，既取决于刀刃的形状精度，又依赖于机床成型运动的精度。

3) 展成法

展成法是利用刀具和工件做展成切削运动来获得加工表面。展成法中刀刃的形状是被加工面的共轭曲线，它在啮合运动中的包络面就是被加工面，如在滚齿机上加工齿轮的齿面。展成法的加工精度取决于刀刃的几何形状精度和啮合运动的精度。

3. 位置精度的获得方法

1) 一次装夹获得法

当零件上有相互位置精度要求的各表面是在同一次装夹中加工出来时，表面相互位置精度是由机床有关部分的相互位置精度来保证的。

2) 多次装夹获得法

当零件上有相互位置精度要求的各表面被安排在不同的安装中加工时，零件表面的相互位置精度主要取决于安装精度。

4.2 机械加工精度的影响因素及控制

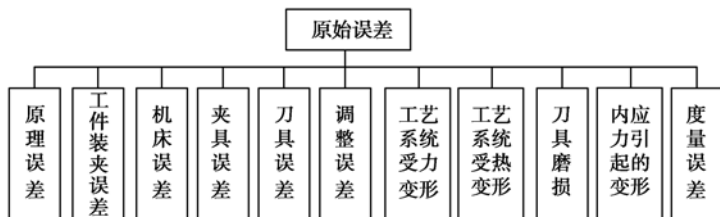
在机械加工中，零件的尺寸、几何形状和表面间相对位置的形成，归结到一点，就是取决于工件和刀具在切削运动过程中相互位置的关系。而工件和刀具，又安装在夹具和机床上，并受到夹具和机床的约束。因此，在机械加工时，由机床、夹具、刀具和工件构成的系统称为工艺系统。工艺系统各环节中所存在的各种误差称为原始误差。正是由于工艺系统各环节中存在各种原始误差，才使得工件加工表面的尺寸、形状和相互位置关系发生变化，造成加工误差。为了保证和提高零件的加工精度，必须采取措施消除或减少原始误差对加工精度的影响，将加工误差控制在允许的变动范围（公差）内。

研究原始误差的物理、力学本质，掌握其基本规律，分析原始误差和加工误差之间的定性与定量关系，这是保证和提高零件加工精度的必要的理论基础。

影响原始误差的因素有很多，一部分与工艺系统本身的初始状态有关，另一部分与切削过程有关，还有一部分与工件加工后的情况有关。一般可将其分为加工前的误差、加工中的误差

和加工后的误差。加工前存在的原始误差称为工艺系统的静误差，在加工过程中产生的原始误差称为工艺系统的动误差。而加工前的误差又分为加工原理误差、机床几何误差、调整误差、刀具夹具制造误差和工件装夹误差。加工中的误差又分为工艺系统受力变形误差、工艺系统热变形误差和磨损误差。加工后的误差又分为度量误差和内应力引起的变形误差。

综上所述，加工过程中可能出现的种种原始误差如下。



其中，加工原理误差是指由于采用了近似的加工运动或者近似的刀具廓形进行加工而产生的误差。例如，滚齿加工常常存在两种原理误差：一种是为了避免加工刀具制造刃磨的困难，常采用阿基米德基本蜗杆或法向直廓基本蜗杆的滚刀来代替渐开线基本蜗杆的滚刀而产生的造型误差；另一种是由于齿轮滚刀刀齿数有限，齿轮的齿形实际上是一条折线，而不是一条光滑的渐开线，与理论上的渐开线相比存在着齿形误差。

再如，在三坐标数控铣床铣削复杂形面工件时，通常要用球头刀并采用“行切法”加工，如图 4-1 所示。所谓行切法，就是球头铣刀与工件轮廓的切点轨迹是一行一行的，而行间的距离 s 是按零件加工要求确定的。究其实质，这种方法是将空间立体形面视为众多的平面截线的集合，每次走刀加工出其中的一条截线。每两次走刀之间的行间距 s 可以按式 (4-1) 确定。

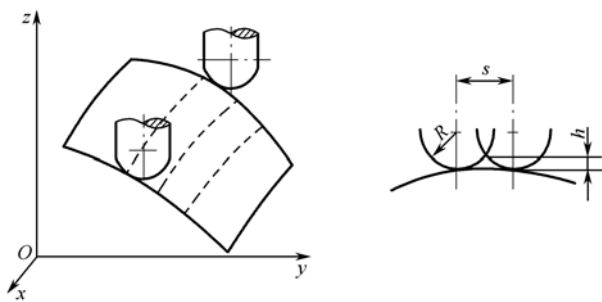


图 4-1 空间复杂曲面的数控加工

$$s = \sqrt{8Rh} \quad (4-1)$$

式中， R 为球头刀半径； h 为允许的表面不平度。

由于数控铣床一般只具有空间直线插补功能，所以即使是加工一条平面曲线，也必须用许多很短的折线段去逼近它。当刀具连续地将这些小线段加工出来，也就得到了所需的曲线形状，逼近的精度可由每根线段的长度来控制。因此，就整个曲面而言，在三坐标联动的数控铣床上加工，实际上是以一段一段的空间直线去逼近空间曲面；或者说，整个曲面就是用大量加工出的小直线段逼近的（如图 4-2 所示）。这说明，在曲线或曲面的数控加工中，刀具相对于工件的成型运动是近似的。

在生产实际中采用近似加工方法的实例很多，采用此方法虽然会带来加工原理误差，但可以简化机床的结构和刀具的形状，降低成本，提高生产率，但由此带来的原理误差必须控制在

允许的范围内，一般原理误差应小于工件公差值的 10%~15%。

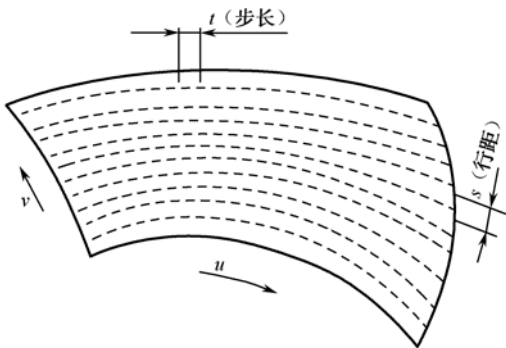


图 4-2 曲面数控加工的实质

4.2.1 工艺系统几何误差对加工精度的影响

工艺系统的几何误差主要是指机床、夹具、刀具本身在制造时所产生的误差，使用中的调整误差和磨损误差，以及工件的定位误差等。这些原始误差将不同程度地反映在被加工工件上，形成零件的加工误差。

1. 机床的几何误差

加工中刀具相对于工件的成型运动一般都是通过机床完成的，因此，工件的加工精度在很大程度上取决于机床的精度。

机床的误差来自三个方面：机床本身的制造、磨损与安装。机床在出厂前必须经过机床精度检查（在没有切削载荷的情况下进行，即机床的静误差检验）。合格的机床经过较长时间的使用后，由于不可避免的磨损、地基变动和其他原因，原有的精度会有不同程度的降低，并产生加工精度问题。

当然，评价一台机床精度的高低，应看机床在切削载荷下的动态情况。而分析机床的静误差是分析其动误差的基础，也是保证机床加工精度的基础。因此，本节主要分析机床静误差中对加工精度影响较大的主轴回转误差、导轨误差和传动链误差。

1) 机床主轴回转误差

机床主轴是装夹工件或刀具的基准，并将运动和动力传给工件或刀具。为了保证加工精度，机床主轴回转时其回转轴线的空间位置应是稳定不变的，但实际上由于受主轴部件结构、制造、装配、使用等种种因素的影响，主轴在每一瞬间回转轴线的空间位置都是变动的，即存在回转误差。所谓主轴回转误差，是指主轴实际回转轴线相对于其理想回转轴线的漂移。其中，理想回转轴线以平均回转轴线（即主轴各瞬时回转轴线的平均位置）来代替。

主轴回转误差将直接影响被加工工件的精度。它不仅对加工表面的形状和位置精度影响较大，而且对加工表面的粗糙度和波纹度影响也较大。尤其是在精密加工中，它是决定工件圆度的主要因素。

主轴回转精度不但和主轴部件的制造精度（包括加工精度和装配精度）有关，而且还和受力后的变形有关，并且随着主轴转速的增加，还需要解决主轴轴承的热变形问题。不过主轴部

件的制造精度是主轴回转精度的基础。

在主轴部件中,存在着主轴轴颈的圆度误差、轴颈的同轴度误差、轴承本身的各种误差、轴承之间的同轴度误差、主轴的挠度和支承端面对轴颈轴线的垂直度误差等误差。主轴在每瞬间的回转轴线的空间位置都是变动的,因此,主轴回转误差是难以避免的。

如图 4-3 所示,主轴回转误差可分为三种基本形式:纯径向跳动、纯角度摆动和纯轴向窜动。

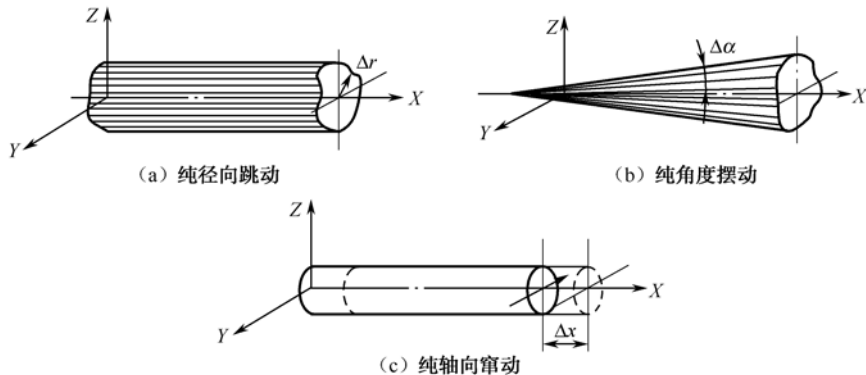


图 4-3 主轴回转误差的基本形式

不同形式的主轴回转误差对加工精度的影响不同,同一形式的回转误差在不同的加工方式(如车削和镗削)中对加工精度的影响也不一样。下面结合几个简单例子对此加以说明。

(1) 主轴的纯径向跳动。这会使工件产生圆度误差,但加工方法不同(如镗削和车削),其影响程度也不尽相同。

① 镗孔情况。如图 4-4 所示,设因为主轴纯径向跳动而使轴线在 y 坐标方向上做简谐直线运动,其频率与主轴转速相同,振幅为 A 。设刀尖处于水平位置时,主轴中心偏移最大(等于 A),当镗刀转过某一角 φ 时,刀尖轨迹的水平 and 垂直分量分别为

$$\begin{aligned} Y &= A \cos \varphi + R \cos \varphi = (A+R) \cos \varphi \\ z &= R \sin \varphi \end{aligned} \quad (4-2)$$

将上面两式平方后相加可得:

$$\frac{y^2}{(R+A)^2} + \frac{z^2}{R^2} = 1 \quad (4-3)$$

这是一个椭圆方程式,表明镗出的孔是一个椭圆孔。

② 车削外圆情况。如图 4-5 所示,工件 1 处的切出半径比在 2、4 处小一个振幅 A ,而在工件 3 处的切出半径则比 2、4 处大一个振幅 A 。这样在工件的上述四点直径都相等,在其他各点处的直径误差也很小,故车削出的工件表面接近于一个真圆,但中心偏移。

(2) 主轴的纯轴向窜动。它对内、外圆加工没有影响,但当加工端面时,会使车出的端面与圆柱面不垂直(如图 4-6 所示),端面对轴线的垂直误差随切削半径的减小而增大。加工螺纹时,轴向窜动会产生螺距周期性误差。

(3) 主轴的纯角度摆动。主轴回转时的纯角度摆动,在车削外圆时仍然可以得到一个圆形工件,但工件是一个圆锥体。在镗床上镗孔时,镗出的孔则为椭圆形,如图 4-7 所示。

为提高主轴回转精度,可采取以下措施:

(1) 提高主轴部件的制造精度。首先应提高轴承的回转精度,如选用高精度的滚动轴承,

或采用高精度的多油楔动压轴承和静压轴承；其次是提高箱体支承孔、主轴颈和与轴承相配合表面的加工精度。

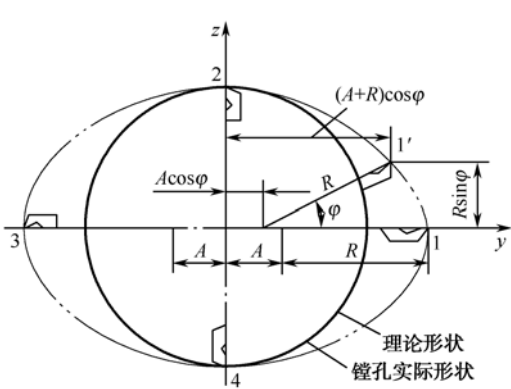


图 4-4 镗孔时纯径向跳动对圆度的影响

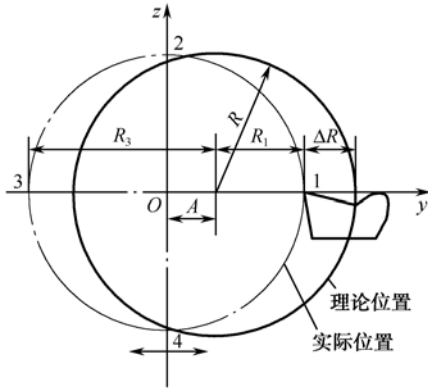


图 4-5 车削时纯径向跳动对圆度的影响

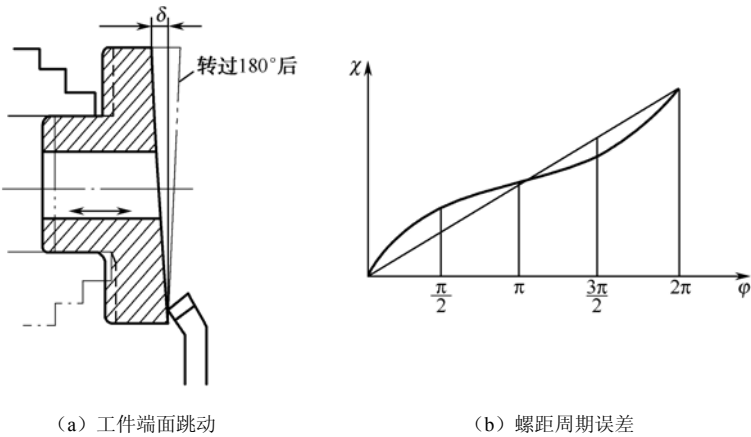


图 4-6 主轴往轴向窜动引起的加工误差

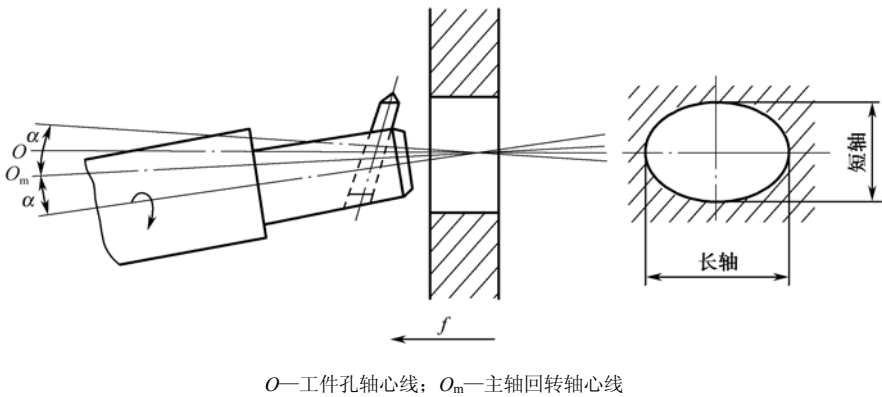


图 4-7 纯角度摆动对镗孔的影响

(2) 对滚动轴承进行预紧。对滚动轴承适当预紧可以消除间隙，甚至产生微量过盈。由于轴承内、外圈和滚动体弹性变形的相互制约，既增加了轴承刚度，又对轴承内、外圈滚道和滚动体的误差起均化作用，所以可提高主轴的回转精度。

此外,可采取措施使主轴的回转精度不反映到工件上,常采用两个固定顶尖支承,主轴只起传动作用。工件的回转精度完全取决于顶尖和中心孔的形状误差和同轴度误差,而提高顶尖和中心孔的精度要比提高主轴部件的精度容易且经济得多。例如,外圆磨床磨削外圆柱面时,就采用固定顶尖支承。

在生产现场中沿用的主轴回转精度测量方法是 将一根精密心轴插入主轴孔,在其外圆表面的两处及端面打表,如图 4-8 所示。这种方法虽然简便,但测得的径向跳动中既包括主轴回转轴线的径向移动,又有锥孔相对于回转轴线的偏心引起的径向移动,无法加以区分。此外,由于打表测量是在主轴慢速回转下进行的,不能反映主轴在工作转速下的回转误差。

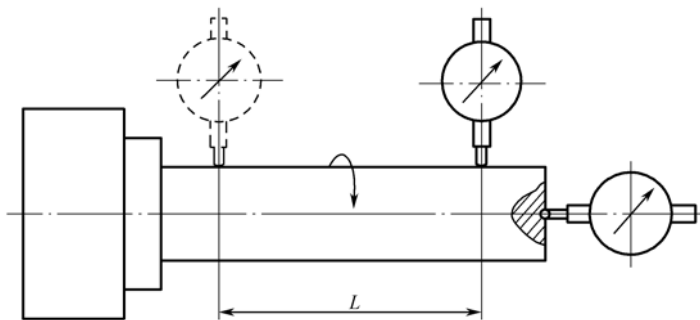
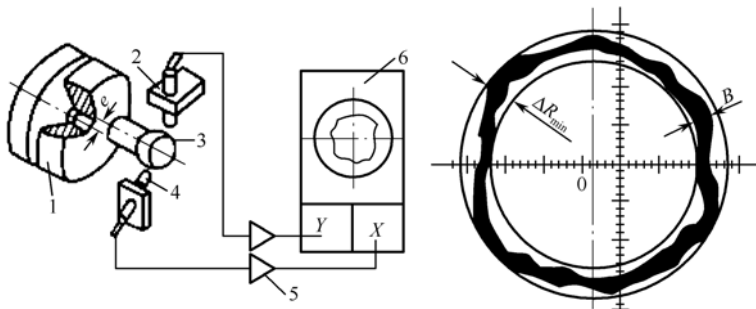


图 4-8 主轴回转精度的常规测量方法

为了更加真实地反映和测量主轴回转精度,可采用传感器测量法。如图 4-9 (a) 所示测量铣镗床类机床主轴回转精度,在主轴端部黏结一个精密测量球 3,球的中心和主轴回转轴线略有偏心 e (由摆动盘 1 进行调整),在球的横向相互垂直的位置上安装两个位移传感器 2、4,并与测量球之间保持一定间隙。当主轴回转时,由于轴线的漂移引起测量间隙产生微小的变化,两个传感器就发出信号,经放大器 5 分别输入示波器 6 的水平和垂直的偏置板上。如果测量球是绝对的圆,主轴的旋转也是正确的,则示波器的显示屏将显示出一个以测量球偏心 e 为半径的真圆;反之,若主轴的旋转存在着径向圆跳动,则传感器输出的信号中,将其跳动量叠加到球心所做的圆周运动上,此时显示屏上的光点将描绘出一个非圆的李沙育图形,如图 4-9 (b) 所示,它由不重合的每转回转误差曲线叠加而成。包容该图形的半径差为最小的两个同心圆的半径差 ΔR_{\min} ,即为主轴回转轴线径向圆跳动,影响加工工件的圆度误差。图形轮廓宽度 B 表示随机径向圆跳动,影响工件的表面粗糙度。



(a) 主轴回转精度测量装置

(b) 描绘的图形

1—摆动盘; 2、4—传感器; 3—精密测量球; 5—放大器; 6—示波器

图 4-9 铣镗床类主轴回转精度的测量方法

由于测量时示波器显示屏上的光点是随主轴回转而描绘出的图形，直接反映了镗刀刀尖的轨迹，所以这种方法能准确地反映铣镗床主轴的回转精度。

2) 导轨误差

床身导轨是机床中主要部件的安装基准，也是运动的基础，它的各项误差直接影响零件的加工精度。例如，车床的床身导轨在水平面内有了弯曲以后，在纵向切削过程中，刀尖的运动轨迹相对于工件轴心线之间就不能保持平行。当导轨向后凸出时，工件上就产生鞍形加工误差；而当导轨向前凸出时，就产生鼓形加工误差。

车床导轨的精度要求主要有以下三个方面。

(1) 车床导轨在水平面内直线度误差 Δy 。如图 4-10，这项误差使刀尖沿着工件半径方向发生位移误差 ΔR_y ， $\Delta R_y = \Delta y$ ，导轨误差将 1:1 地反映为工件表面的圆柱度误差（鞍形或鼓形）。

(2) 车床导轨在垂直面内的误差 Δz 。如图 4-11 所示，这项误差将使刀具产生垂直位移，工件表面产生半径误差 ΔR_z ，由图可知：

$$(R + \Delta R_z)^2 = R^2 + \Delta z^2$$

(4-4)

忽略 ΔR_z^2 项，可得：

$$\Delta R_z \approx \frac{\Delta z^2}{2R}$$

(4-5)

即工件直径误差为

$$\Delta D \approx \frac{2\Delta z}{R}$$

(4-6)

$\Delta R_z = \Delta z^2 / 2R$ ，其值很小，对加工精度的影响可以忽略不计。但是对于龙门刨床、龙门铣床加工薄长件时，由于工件的刚性不足，如果机床导轨为中凹，则工件会中凸。

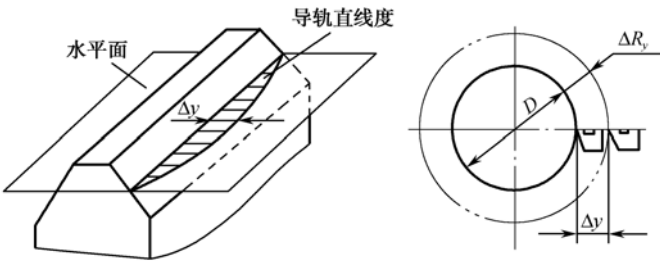


图 4-10 车床导轨在水平面内直线度引起的误差

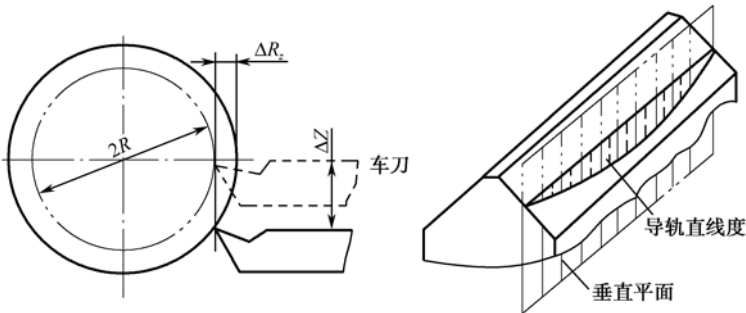


图 4-11 车床导轨在垂直面内直线度引起的误差

从以上分析可以看出，车床导轨在各个方向上的误差对加工精度的影响是不同的。这里引

入误差敏感方向的概念。所谓误差敏感方向,就是指通过刀刃的加工表面的法线方向,在此方向上原始误差对加工误差影响最大。在分析导轨导向误差对加工精度的影响时,主要考虑导轨误差引起刀具与工件在误差敏感方向的相对位移。

以图 4-12 所示的外圆车削为例,工件的回转轴心在 O , 刀尖正确位置在 A , 设某一瞬时由于各种原始误差的影响,使刀尖位移到 A' , AA' 即为原始误差 δ , 它与 OA 间夹角为 ϕ , 由此引起工件加工后的半径由 $R_0=OA$ 变为 $R=OA'$, 故半径上(即工序尺寸方向上)的加工误差 ΔR 为

$$\Delta R = OA' - OA = \sqrt{R_0^2 + \delta^2 + 2R_0\delta\cos\phi} - R_0 \quad (4-7)$$

当 $\phi=0^\circ$ 时, ΔR 得到极大值,即 $\Delta R_{\max}=\delta$; 此时刀刃位于加工表面的法线方向,原始误差 1:1 地表现为加工误差。当 $\phi=90^\circ$ 时, ΔR 得到极小值,由 $R_0^2 + \delta^2 = (R_0 + \Delta R_{\min})^2$, 得 $\delta^2 = 2R_0\Delta R_{\min} + \Delta R_{\min}^2$ 。省略误差的平方项 ΔR_{\min}^2 , 得到近似表达式 $\Delta R_{\min} = \delta^2 / (2R_0)$ 。这时 ΔR_{\min} 很小,往往可以忽略不计。

分析原始误差对加工精度的影响时,对于一般方向的原始误差, ϕ 值为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 可将该原始误差引起的加工误差向误差敏感方向投影,并只考虑该投影对加工误差的影响。

(3) 车床导轨的平行度误差。在垂直平面内,当两导轨不平行、存在扭曲时,刀架产生倾斜,使刀具相对于工件在水平和垂直两个方向上发生偏移,会影响加工精度。如图 4-13 所示,当前、后导轨有平行度误差 δ , 则工件半径的变化量 $\Delta R \approx \Delta y = (H/B) \delta$ 。一般车床 $H/B \approx 2/3$, 外圆磨床 $H/B \approx 1$, 因此这项原始误差对加工精度的影响不容忽视。床身导轨与主轴的轴线在水平面内不平行, 工件形状为圆锥形, 在垂直面内不平行, 工件形状为双曲面。

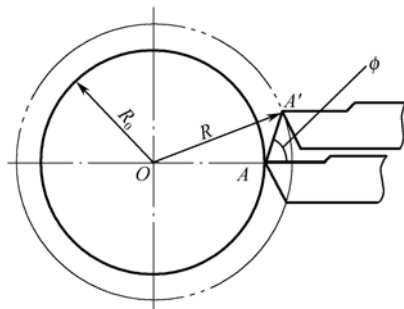


图 4-12 误差的敏感方向

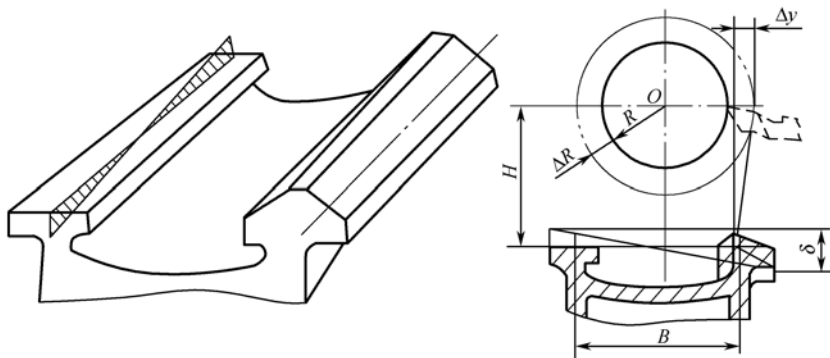


图 4-13 车床前后导轨不平行引起的误差

除了导轨本身的制造误差之外,导轨磨损也是造成机床精度下降的主要原因。选用合理的导轨形状和导轨组合形式,采用耐磨合金铸铁导轨、镶钢导轨、贴塑导轨、滚动导轨以及对导轨进行表面淬火处理等措施均可提高导轨的耐磨性。

总而言之,为减少导轨导向误差,在导轨设计制造时,应从结构、材料、润滑、防护装置等方面采取有效措施以提高导向精度;在机床安装时,应校正好水平和保证地基质量;在使用

时,要注意调整导轨配合间隙,同时保证良好的润滑和维护。

导轨三项误差的常规检验方法有:

- ① 水平面内的直线度误差,采用桥板和准直仪较受欢迎。
- ② 垂直面内的直线度误差,采用与导轨相配合的桥板、水平仪,在导轨纵向上分段检测,记下水平仪的读数,画出曲线图,再计算其误差大小和判断凹凸程度。

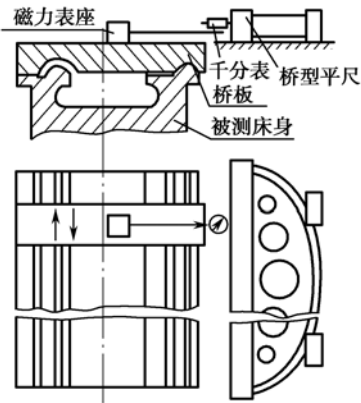


图 4-14 车床导轨综合原始误差的检测

对于某些表面的加工,如车螺纹、滚齿和插齿等,为了保证工件的精度,要求工件和刀具间的运动必须有准确的速比关系。当传动链中的各传动元件(如齿轮、蜗轮、蜗杆等)存在制造误差、装配误差和磨损时,会破坏正确运动关系,影响刀具与工件间相对运动的正确性,使工件产生误差。对于机械传动机床,传动链一般由齿轮副、蜗杆副、丝杠螺母副等组成。

图 4-15 所示为某滚齿机用单头滚刀加工直齿轮时的传动链图。由于传动链中各组成环节的制造和装配误差,每个传动件的误差都通过传动链影响被切齿轮的精度,由于各传动件在传动链中所处的位置不同,它们对被切齿轮的加工精度(即末端件的转角误差)的影响程度也不同。

若齿轮 z_1 有转角误差 $\Delta\phi_1$, 而其他各传动件无误差,则由 $\Delta\phi_1$ 产生的工件转角误差为

$$\Delta\phi_n = \Delta\phi_1 \times \frac{80}{20} \times \frac{28}{28} \times \frac{28}{28} \times \frac{42}{56} \times i_c \times \frac{e}{f} \times \frac{a}{b} \times \frac{c}{d} \times \frac{1}{72} = k_1 \Delta\phi_1 \tag{4-8}$$

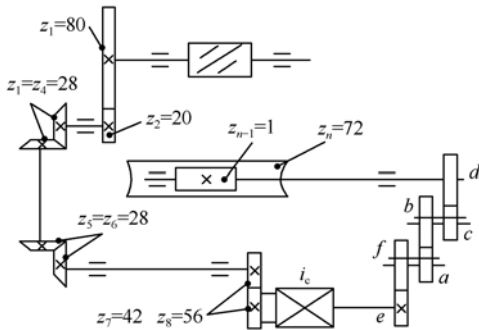


图 4-15 齿轮机床传动链

式中, i_c 为差动轮系的传动比,在滚切直齿时, $i_c=1$; k_1 为 z_1 到工作台的传动比。

这里 k_1 反映了齿轮 z_1 的转角误差对终端工作台转动精度的影响,称为误差传递系数。同理,若第 j 个传动元件有转角误差 $\Delta\phi_j$, 则该转角误差通过相应的传动链传递到工作台上的转

角误差为

$$\Delta\phi_{jn} = k_j \Delta\phi_j \quad (4-9)$$

式中, k_j 为第 j 个传动件的误差传递系数。

由于传动链中所有传动件都可能存在误差, 所以各传动件对被切齿轮精度影响的总和 $\Delta\phi_e$ 为

$$\Delta\phi_e = \sum_{j=1}^n \Delta\phi_{jn} = \sum_{j=1}^n k_j \Delta\phi_j \quad (4-10)$$

为减少传动链误差, 可采用以下措施:

(1) 尽量缩短传动路线, 减少传动元件数量。

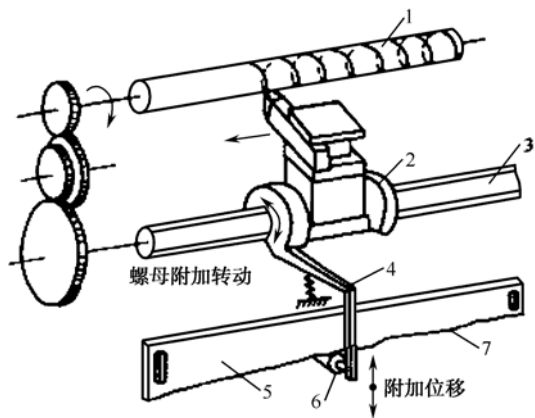
(2) 减少各传动元件装配时的几何偏心, 提高装配精度。

(3) 提高传动链末端元件的制造精度。在一般的降速传动链中, 末端元件的误差影响最大, 故末端元件 (如滚齿机的分度蜗轮、螺纹加工机床的母丝杠等) 的精度应高一些。

(4) 在传动链中按降速比递增的原则分配各传动副的传动比。传动链末端传动副的降速比取得越大, 则传动链中其余各传动元件误差的影响就越小。为此, 分度蜗轮的齿数应取得较多, 母丝杠的螺距也应较大, 这有利于减少传动链误差。

(5) 采用校正装置。校正装置的实质是在原传动链中人为地加入一个误差, 其大小与传动链本身的误差相等而方向相反, 从而使之相互抵消。

例如, 高精度螺纹加工机床常采用的机械式校正机构, 其原理如图 4-16 所示。根据测量被加工工件 1 的导程误差, 设计出校正尺 5 上的校正曲线 7。校正尺 5 固定在机床床身上。加工螺纹时, 机床母丝杠带动螺母 2 及与其相固连的刀架和杠杆 4 移动。同时, 校正尺 5 上的校正误差曲线 7 通过触头 6、杠杆 4 使螺母 2 产生一附加转动, 从而使刀架得到一个附加位移, 以补偿传动误差。



1—工件；2—螺母；3—丝杠；4—杠杆；5—校正尺；6—触头；7—校正曲线

图 4-16 丝杠加工误差校正装置

传动链的传动精度可用磁分度仪和光栅式分度仪等装置来测量。测量得到的传动误差曲线输入频谱分析仪, 可以得到传动误差的各阶谐波分量, 并可以根据各误差分量幅值的大小找出影响传动误差的主要环节。

2. 工艺系统其他几何误差

1) 刀具误差

刀具误差对加工精度的影响, 根据刀具种类不同而异。

对于普通刀具, 如车刀、镗刀、铣刀等, 当采用轨迹法加工时, 其制造精度对加工精度无直接影响。但刀具几何参数和形状将影响刀具的耐用度, 因此间接影响加工精度。

定尺寸刀具如钻头、绞刀、键槽铣刀、镗刀块及圆拉刀等, 加工时刀具的尺寸精度直接影响加工工件的尺寸精度。若刀具在安装使用中方法不当, 也将影响加工精度。成型刀具(如成型车刀)的制造和安装误差及磨损主要影响被加工工件表面的形状误差。

采用成型车刀、成型铣刀、成型砂轮等成型刀具加工时, 刀具的形状精度将直接影响工件的形状精度; 采用展成法加工时, 如齿轮滚刀、花键滚刀、插齿刀等展成刀具的刀刃形状必须是加工表面的共轭曲线。因此, 刀刃的形状误差和尺寸误差会影响加工表面的形状精度。

在切削过程中, 刀具会逐步磨损, 使原有形状和尺寸发生变化, 由此引起工件尺寸和形状误差。在加工工件较大或一次走刀需较长时间时, 对尺寸精度发生较大的影响; 当用调整法加工一批工件时, 刀具的磨损会扩大工件尺寸的分散范围。

2) 夹具误差

夹具的作用是使工件相对于刀具和机床具有正确的位置, 因此夹具的误差对工件的位置精度和尺寸精度的加工影响很大。夹具误差一般指定位元件、导向元件及其夹具体等零件的加工和装配误差。夹具磨损将使夹具误差增大, 从而使工件的加工误差也相应增大。为了保证工件的加工精度, 除了严格保证夹具的制造精度外, 必须注意提高夹具易磨损件的耐磨性, 当磨损到一定限度后需及时予以更换。

3) 测量误差

工件加工后能否达到顶定的加工精度, 必须用测量结果来加以鉴别。为了防止废品的产生, 不仅在工艺系统的调整时必须以测量结果为依据, 而且在加工过程中还必须随时依靠测量手段来防止工件超差。但任何一种精密量具、量仪和测量方法都不可能绝对准确, 测量出来的数据只能是一个近似值。测量有了误差, 显然也会引起加工误差。产生测量误差的原因, 主要有以下三个方面。

(1) 量具、量仪和测量方法本身的误差。量具、量仪制造时不可能绝对准确, 其制造误差如刻度不准确等必将直接影响测量精度。尤其不可忽视的是, 所采用的测量方法和量具结构如果不符合“阿贝原则”, 就会产生较大的测量误差(称为“阿贝误差”)。所谓“阿贝原则”, 是指测量时工件上的被测量线应与量具上作为基准尺的测量线在同一直线上。

(2) 环境条件的影响。测量时影响测量精度的环境条件因素, 最主要的是温度和振动。温度引起测量误差的原因在于测量时量具和工件的热变形量不相等。如果测量时量具与工件温度不同, 当然会产生测量误差, 即使量具和工件温度相同, 由于二者材料不同、线膨胀系数不等, 同样会产生测量误差。如果测量时有振动, 就会使工件位置变动和量具读数不稳定。

(3) 操作人员主观因素的影响。若测量时测量力过大, 将引起较大的接触变形而出现测量误差; 若测量力过小, 则又不能保证量具与被测表面良好地接触。一批工件测量时(或同一工件重复测量时), 因为测量力不一致, 就会出现测量误差。另外, 人的分辨能力有限, 测量时产生视差等因素都会引起读数的误差而产生测量误差。

4) 调整误差

零件加工的每一个工序中,为了获得被加工表面的形状、尺寸和位置精度,总要进行一些调整工作(如安装夹具、调整刀具尺寸等)。由于调整不可能绝对准确,所以也会带来加工误差。

例如,在卧式镗床上镗箱体孔时,要进行夹具在工作台上的安装位置调整,镗床主轴的高度调整,后支承与主轴的同轴度调整,工作台纵向、横向位置的调整和进给行程的调整,以及镗刀刃在镗杆上伸出量的调整等。上述调整还应包括静态的初调和试切工件后的精调。

调整误差的来源,视不同的加工方式而有所不同。

(1) 试切法。单件小批生产中普遍采用试切法加工。利用试切法进行加工,在正式切削前需要测量和进刀调整,这时引起调整误差的因素有以下几种。

① 测量误差:指量具本身的精度、测量方法或使用条件下的误差(如温度影响、操作者的细心程度)等,它们都影响调整精度,因而产生加工误差。

② 机床进给机构的位移误差:当试切最后一刀时,往往要按刻度盘的显示值来微量调整刀架的进给量,这时常会出现进给机构的“爬行”现象,结果使刀具的实际位移与刻度盘显示值不一致,造成加工误差。

微量进给时的爬行现象对进给位移的影响,如图 4-17 所示。产生爬行的原因是由于进给溜板与导轨间摩擦系数在极低的滑移速度范围时将随滑移速度的增加而降低,如图 4-18 所示。当进给机构工作时,由于传动元件间有弹性变形,故可抽象为主动件通过弹簧推动溜板,如图 4-19 所示。当主动件微量向左移动时,弹簧受压缩,但这时摩擦阻力 $Gf_0 > kx_1$,溜板仍静止(如图 4-19 (a) 所示),当主动件继续前进到 $kx_2 = Gf_0$ 时(如图 4-19 (b) 所示),溜板开始左移,摩擦系数因滑移速度增加而降低,当 $kx_3 > Gf$ (如图 4-19 (c) 所示),溜板就加速前进,这时溜板速度超越主动件而使弹簧压缩量减小,溜板速度逐渐减小而摩擦阻力逐渐增大,溜板就又停止前进。如此反复就形成爬行。改善的方法主要是提高滑移面的加工精度、减小表面粗糙度、改善润滑条件和提高进给传动系统的刚性。采用静压导轨、滚珠丝杠及在导轨面上粘贴聚四氟乙烯层等也是消除爬行现象的有效措施。此外,操作时常采用两种防止爬行的措施:一种是在微量进给时先将刀架后退一定距离,然后以较快的速度不停顿地把刀架送进到所需位置上;另一种是轻轻敲击手柄。使微量进给时产生振动,利用振动来消除静摩擦的影响。

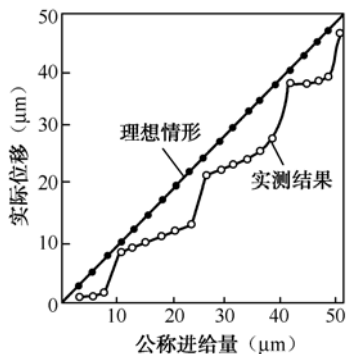


图 4-17 爬行对进给的影响

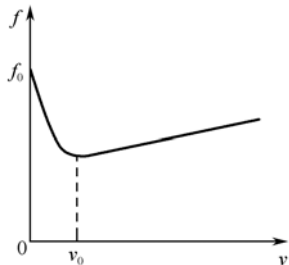


图 4-18 摩擦系数与滑移速度的关系

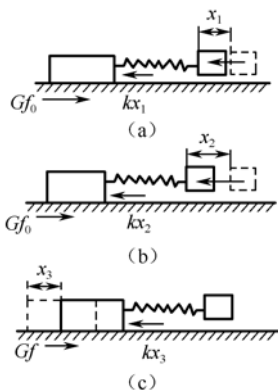


图 4-19 爬行机理

③ 试切时与正式切削时切削层厚度不同的影响:精加工时,试切的最后一刀往往很薄,切削加工中刀刃能切掉的最小切削层厚度有一定的限度,切削厚度过小时,刀刃只起挤压作用

而不起切削作用。但正式切削时切深大于试切部分，刀刃不打滑，就会多切下一点，因此工件尺寸就与试切部分不同。在粗加工时，试切的最后一刀切削厚度较大，刀刃不会打滑，但正式切削时切深大，受力变形也大，因此切除的金属层会比试切部分少一些，同样会引起工件的加工误差。

(2) 调整法。由于采用调整法对工艺系统进行调整时，也要以试切为依据，所以上述影响试切法调整精度的因素同样也对调整法有影响。此外，影响调整精度的因素还有如下几种。

① 定程机构误差：在大批大量生产中广泛采用行程挡块、靠模、凸轮等机构保证加工尺寸。这时，这些定程机构的制造精度和调整以及与它们配合使用的离合器、电气开关、控制阀等的灵敏度就成为调整误差的主要来源。

② 样件或样板误差：采用样件或样板调整法时是根据样件或样板来决定刀具与工件间相对位置的，因此样件、样板的制造误差、安装误差和对刀误差就成为调整误差的主要因素。

③ 夹具的安装调整误差：夹具在机床上的安装调整精度，直接影响工件在机床上是否占有正确的位置。夹具在机床上定位时定位键与 T 形槽、定位孔与止口、钻夹具的导向套与心棒（或刀具）等的配合间隙是影响夹具安装调整误差的主要因素。

④ 抽样平均尺寸的误差：由于切削过程中各种随机性误差的影响，一次调整中加工出的工件尺寸会在某一范围内变动。因此只根据首件加工测得的尺寸进行调整，会带来较大的误差。为减少这一误差，一般都以在一次调整中试加工的几个工件的平均尺寸作为进一步调整的依据。但试加工工件的件数（称为抽样件数）不可能太多，因此不可能把整批工件切削过程中各种随机性误差完全反映出现，故抽样平均尺寸与总体平均尺寸不可能完全符合，这误差就是抽样平均尺寸的误差。

在抽样平均尺寸误差中，定程机构的重复定位误差占有很大的比重；定程机构的重复定位误差是指每一次重新定位时工件与刀具相对位置的最大变动量。影响重复定位误差的主要因素是定程机构的结构形式、刚度和定位时压力的大小等。一般来说，定程机构的刚度越大则重复定位精度也越高，固定挡块的重复定位精度高于活动挡块，挡块位置与刀具或进给丝杠的距离越近则重复定位精度也越高。定程时挡块与触头间压力大小不一，就会引起弹性变形和接触变形的不一致，也就降低了重复定位精度。此外，与定程机构配合动作的离合器、限位开关或控制阀等的灵敏度，对重复定位精度也有很大的影响。

4.2.2 工艺系统受力变形对加工精度的影响

在切削力、传动力、惯性力、夹紧力以及重力等的作用下，工艺系统将产生相应的变形（弹性变形和塑性变形）和振动。这种变形和振动会破坏刀具和工件之间的成型运动、位置关系和速度关系，还影响切削运动的稳定性，从而造成各种加工误差。

如果车削刚性较差的工件，工件在切削力的作用下会发生变形，加工出的工件会出现两头细、中间粗的腰鼓形，如图 4-20（a）所示；若工件刚性很好而机床刚性很差，由机床变形引起的“让刀”现象会使车出的工件呈两头大、中间小的鞍形。在内圆磨床上采用径向进给磨孔时，由于内圆磨头主轴弯曲变形，磨出的孔会出现带有锥度的圆柱度误差，如图 4-20（b）所示。

由此可见，工艺系统受力变形是加工中一项很重要的误差来源，它严重影响工件的加工精度。工艺系统的受力变形通常是弹性变形，一般说来，工艺系统抵抗弹性变形的能力越强，加工精度越高。

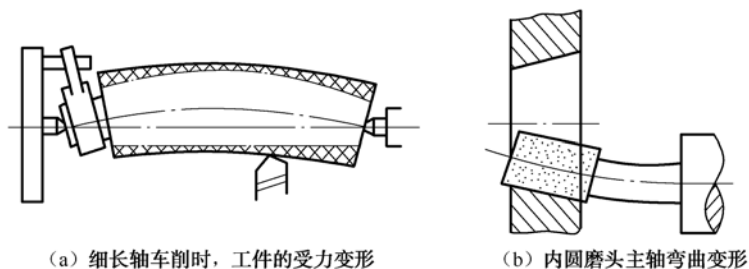


图 4-20 工艺系统受力变形对加工精度的影响

1. 工艺系统刚度分析

工艺系统在外力的作用下所产生的变形位移大小取决于外力的大小和系统抵抗外力的能力。工艺系统抵抗外力使其变形的能力称为刚度, 是以切削力和在该力方向上所引起的刀具和工件间相对变形位移的比值来表示的。

由于切削力有三个分力, 所以刚度也有相应三个方向的刚度。但是, 在切削加工中, 对加工精度影响最大的是刀刃沿加工表面的法线方向(背向力)的分力, 因此计算工艺系统刚度 k_{xt} 时, 通常只考虑此方向(本书定义为 y 方向)的切削分力 F_p 和变形位移量 y_{xt} , 即

$$k_{xt} = \frac{F_p}{y_{xt}} \quad (4-11)$$

应当指出, 法线方向的位移是总切削力作用下工艺系统综合变形的结果, 因此有可能出现变形方向与 F_p 的方向不一致的情况。当 F_p 与 y_{xt} 方向相反时, 即出现负刚度, 如图 4-21 所示。负刚度现象对保证加工质量是不利的, 应尽量避免。

由于切削过程中切削力是不断变化的, 工艺系统在动态下产生的变形不同于静态下的变形, 这样就有静刚度和动刚度的区别。一般情况下, 工艺系统的动刚度与静刚度成正比关系, 此外还与系统的阻尼、交变力频率及系统的固有频率之比有关。为了搞清楚工艺系统受力变形的最基本的概念, 本节只讨论静刚度问题。以下涉及刚度均指静刚度。

工艺系统由机床、夹具、刀具及工件组成, 因此工艺系统受力变形总位移 y_{xt} 是由各组成部分变形位移 y_{jc} 、 y_{jj} 、 y_{dj} 、 y_{gi} 的叠加, 即

$$y_{xt} = y_{jc} + y_{jj} + y_{dj} + y_{gi} \quad (4-12)$$

式中, y_{xt} 为工艺系统总的变形量; y_{jc} 为机床变形量; y_{jj} 为夹具变形量; y_{dj} 为刀具变形量; y_{gi} 为工件变形量。

根据刚度定义, 工艺系统各组成环节的刚度为: 机床刚度 $k_{jc} = F_p / y_{jc}$, 夹具刚度 $k_{jj} = F_p / y_{jj}$, 刀架刚度 $k_{dj} = F_p / y_{dj}$, 工件刚度 $k_{gi} = F_p / y_{gi}$, 则

$$k_{xt} = \frac{F_p}{y_{xt}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{jc}} + \frac{1}{K_{jj}} + \frac{1}{K_{dj}} + \frac{1}{K_{gi}}} \quad (4-13)$$

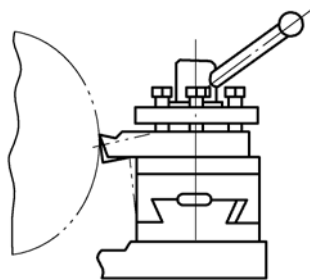
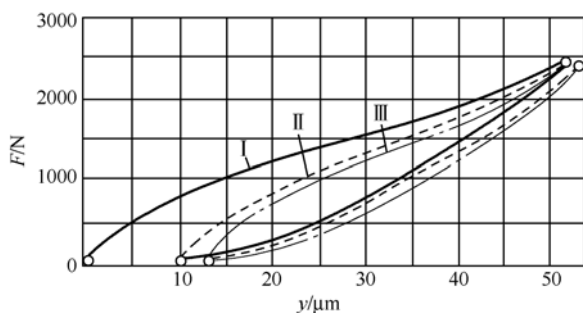


图 4-21 车削时工艺系统的负刚度现象

也就是说,当知道工艺系统的各组成部分的刚度之后,就可以求出整个工艺系统的刚度。显然,工艺系统的刚度主要取决于薄弱环节的刚度。

在工艺系统的受力变形中,机床的变形最为复杂,且通常占主要成分。由于机床部件刚度的复杂性,很难用理论公式来计算,一般都用实验方法来测定。图 4-22 所示是对某台卧式车床刀架部件施加静载荷得到的变形曲线。试验时载荷逐渐加大,再逐渐减少,反复三次。图中所示为三次加载卸载的曲线。



I、II、III分别表示三次加载

图 4-22 车床刀架的静刚度特性曲线

由图 4-22 所示可以看出机床部件刚度的特点:

- (1) 作用力和变形不是线性关系,反映出刀架的变形不纯粹是弹性变形。
- (2) 加载与卸载曲线不重合,两曲线间包容的面积代表了加载-卸载循环中所损失的能量,即外力在克服部件内零件间的摩擦力和接触面塑性变形所做的功。
- (3) 卸载后曲线不回到原点,说明产生了残余变形。在反复加载-卸载后,残余变形逐渐接近于零。

(4) 部件的实际刚度远比按实际估算的要小。由于机床部件的刚度曲线不是线性的,其刚度不是常数,一般取曲线两端点连线的斜率来表示其平均刚度。

上述试验说明了部件的受力变形和单个零件的受力变形是大有区别的。后者是零件本身的弹性变形,而前者除了零件本身的弹性变形外,还有其他因素。机床部件一般都由多个零件组成,因而影响机床部件刚度的因素很复杂,主要包括以下几方面。

1) 接触变形(零件与零件间接触点的变形)

在外力作用下,由于零件表面几何形状误差和表面粗糙度的影响,使得零件之间接合表面的实际接触面积只是理论接触面的一小部分,真正处于接触状态的又只是一些凸峰。这些接触点处将产生较大的接触应力,并产生接触变形,其中有表面层的弹性变形,也有局部塑性变形。这就是部件刚度曲线不呈直线,以及部件刚度远比同尺寸实体的刚度要低得多的主要原因。接触面塑性变形的最后结果造成了上述残余变形,在多次加载卸载后,接触状态才趋于稳定。

接触变形是出现残余变形的一个原因,另一种原因是由于接触点之间存在着油膜,经过几次加载后油膜才能排除,这一现象也影响残余变形的性质。这种现象在滑动轴承副中最为显著。

2) 薄弱零件本身的变形

在机床部件中,薄弱零件受力变形对部件刚度的影响很大。例如刀架和溜板部件中的楔铁,由于其结构细长,加上又难以做到平直,以致装配后与导轨配合不好,容易产生变形。又如,滑动轴承衬套因为形状误差而与壳体局部接触,在外力作用下极易产生变形,故造成整个部件

刚度大大降低。

3) 零件表面间摩擦力的影响

机床部件受力变形时, 零件间连接表面会发生错动, 加载时摩擦力阻碍变形的发生, 卸载时摩擦力阻碍变形的恢复, 造成加载和卸载刚度曲线不重合。

4) 接合面的间隙

部件中各零件间如果有间隙, 那么只要受到较小的力(克服摩擦力)就会使零件相互错动, 表现为刚度低。加工过程中, 如果单向受载, 那么在第一次加载消除间隙后对加工精度的影响较小; 如果工作载荷不断改变方向(如镗床、铣床的切削力), 则间隙的影响不容忽视。

2. 工艺系统刚度对加工精度的影响

1) 由于切削力作用点位置变化而使工件产生形状误差

下面以顶尖装夹车削光轴为例来说明这一问题, 如图 4-23 所示。图中, 工件两支点的距离为 l , 背向力 F_y 随刀具纵向切削而改变位置。当刀具作用点在距离床头前顶尖 x 处时, 通过工件作用于床头箱(含前顶尖)部件和尾架(含后顶尖)部件的力分别为 F_A 和 F_B , 刀架受力为 F_y 。从而使床头箱位置由 $A \rightarrow A'$, 尾架位置由 $B \rightarrow B'$, 刀架位置也由 $C \rightarrow C'$, 其值分别为 y_{ct} 、 y_{wz} 和 y_{dj} 。相应地使工件中心由 $AB \rightarrow A'B'$, 在 x 处移动量为 y_x 。

床头箱和尾座的刚度分别为 k_{ct} 和 k_{wz} , 则床头箱和尾座的变形可用下式表示:

$$\begin{aligned} y_{ct} &= \frac{F_A}{k_{ct}} = \frac{(l-x)F_p}{lk_{ct}} \\ y_{wz} &= \frac{F_B}{k_{wz}} = \frac{x F_p}{lk_{wz}} \end{aligned} \quad (4-14)$$

由图中的几何关系可得:

$$\begin{aligned} \frac{x}{y_x - y_{ct}} &= \frac{l}{y_{wz} - y_{ct}} \\ y_x &= \frac{l-x}{l} y_{ct} + \frac{x}{l} y_{wz} \end{aligned} \quad (4-15)$$

将 y_{ct} 和 y_{wz} 代入式 (4-15) 得:

$$y_x = \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 \frac{F_p}{k_{ct}} + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \frac{F_p}{k_{wz}} \quad (4-16)$$

式中, y_x 为车刀在 x 处时机床的变形量。

如果再考虑刀架的变形 y_{dj} , 则系统的变形为

$$y_{xt} = y_x + y_{dj} = F_p \left[\frac{1}{k_{dj}} + \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{ct}} + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{wz}} \right] \quad (4-17)$$

如果工件刚度较差, 还应该考虑工件的变形 y_{gj} , 按简支梁计算

$$y_{gj} = \frac{F_p (l-x)^2 x^2}{3EI}$$

则工艺系统的总变形为

$$y_x = F_p \left[\frac{1}{k_{dj}} + \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{ct}} + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{wz}} + \frac{(l-x)^2 x^2}{3EI} \right] \quad (4-18)$$

工艺系统的刚度 k_{xt} 为

$$k_{xt} = \frac{1}{\frac{1}{k_{dj}} + \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{ct}} + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{wz}} + \frac{(l-x)^2 x^2}{3EI}} \quad (4-19)$$

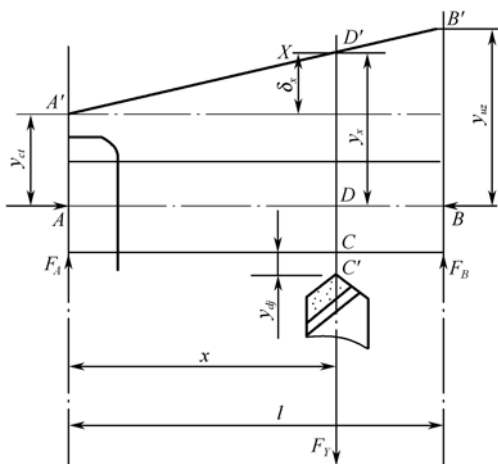


图 4-23 工艺系统变形随切削力位置变化而变化

由此可知，工艺系统的刚度在沿工件轴向的各个位置是不同的，所以加工后工件各个横截面上的直径尺寸也不同，造成了加工后工件的形状误差（如锥度、鼓形、鞍形等），加工后工件的直径误差 $\delta_d = 2y_x$ 。

由于受力点位置的不同，引起工件的形状误差（圆柱度、直线度） δ_x ，可运用求极值的方法求出极大值，再求 $x=0$ 或者 $x=l$ 时的最小值，两者之差即为工件形状误差 δ_x 。

式（4-19）反映的是一般车削加工实例。

假设以双顶尖装夹工件进行外圆车削加工，工件短而粗，刚度很高，工件载受力下的变形可忽略不计，则工艺系统的总变形完全取决于床头箱、尾座（包括顶尖）和刀架的变形。此时，工艺系统的总位移为

$$y_x = F_p \left[\frac{1}{k_{dj}} + \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{ct}} + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{wz}} \right] \quad (4-20)$$

工艺系统的刚度 k_{xt} 为

$$k_{xt} = \frac{1}{\frac{1}{k_{dj}} + \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{ct}} + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \frac{1}{k_{wz}}} \quad (4-21)$$

假设工件细而长,刚度很低,而床头箱、尾座(包括顶尖)和刀架的变形可忽略不计,则此时工艺系统的总位移为

$$y_x = \frac{F_p}{3EI} \cdot \frac{(l-x)^2 x^2}{l} \quad (4-22)$$

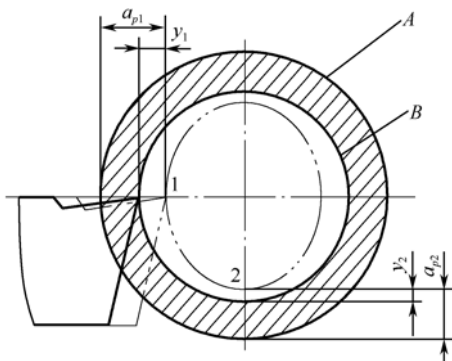
工艺系统的刚度 k_{xt} 为

$$k_{xt} = 3EI \cdot \frac{l}{(l-x)^2 x^2} \quad (4-23)$$

2) 误差复映

在切削过程中,往往由于被加工表面的几何形状误差或材料的硬度不均匀引起切削力大小的变化,从而造成工件的加工误差。

图 4-24 所示为车削一个有圆度误差的毛坯。车削时,将车刀调整到双点画线所示位置。工件在每一转的过程中,切削深度不断发生变化, $a_{p1} > a_{p2}$ 。切削深度大时,切削力大,刀具相对工件的位移也大;切削深度小时,切削力小,刀具相对工件的位移也小,使得 $y_1 > y_2$ 。其结果是毛坯的椭圆形误差在加工后仍以一定的比例反映在工件的表面上。



A—毛坯表面; B—工件表面

图 4-24 毛坯形状误差的复映

由于工艺系统的受力变形,工件加工前的误差 Δm 以类似的形状反映到加工后的工件上,造成加工后误差 Δw ,这种现象称为误差复映。误差复映的程度通常以误差复映系数 ε 表示。由图 4-24 所示可得:

$$\Delta m = a_{p1} - a_{p2};$$

$$\Delta w = y_1 - y_2 = \frac{F_{p1} - F_{p2}}{k_{xt}} = \frac{C_{F_p} f^{Y_{fp}}}{k_{xt}} [(a_{p1} - y_1) - (a_{p2} - y_2)] \quad (4-24)$$

$$\text{可得:} \quad \varepsilon = \frac{\Delta w}{\Delta m} = \frac{y_1 - y_2}{a_{p1} - a_{p2}} = \frac{C_{F_p} f^{Y_{fp}}}{k_{xt} + C_{F_p} f^{Y_{fp}}} \quad (4-25)$$

在一般情况下,因为 k_{xt} 远大于 $C_{F_p} f^{Y_{fp}}$, 故可以在简化计算时取:

$$\varepsilon = \frac{\Delta w}{\Delta m} = \frac{C_{F_p} f^{Y_{fp}}}{k_{xt}} \quad (4-26)$$

式中, C_{F_p} 为径向切削力系数; f 为进给量; Y_{fp} 为进给量对切削力的影响指数;

式(4-26)表示了加工误差与毛坯误差之间的比例关系, 说明了误差复映规律。误差复映系数 ε 可定量反映毛坯误差经过加工后减小的程度; 工艺系统刚度越高, ε 越小, 复映到工件上的误差越小。

当加工过程分成几个工步进行时, 因为每个工步的复映系数分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 ……则总的复映系数 $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \cdots$

为减少误差复映, 主要的措施是提高工艺系统的刚度。有时也可通过改变进给量及刀具材料或切削角度来实现。一般来说, 误差复映系数是一个小于1的数, 表明该工序有一定的误差修正能力。在加工精度要求较高的情况下, 工件毛坯的误差可以通过多道工序或多次走刀加工逐步减小到零件公差所允许的范围之内。

应当注意, 在大批大量生产中, 都是采用定尺寸调整法加工, 即刀具在调整到一定切深后, 就一件件连续加工下去, 不再逐次试切、逐次调整切深。这样, 对于一批尺寸大小有参差的毛坯而言, 每件毛坯的加工余量都不一样, 由于误差复映的结果, 也就造成了一批工件的尺寸分散。为了保证尺寸分散不超出允许的公差范围, 就必须查明误差复映的大小, 采用分组加工方法进行加工。

例如, 在车床上半精镗一短套工件的内孔, 加工前内孔的圆度误差为0.4mm, 加工后要求圆度误差达到0.01mm。已知床头刚度 $k_{ct}=40\,000\text{N/mm}$, 刀架刚度 $k_{dj}=3\,000\text{N/mm}$, 尾座刚度 $k_{wz}=25\,000\text{N/mm}$, 进给量 $f=0.05\text{mm/r}$, 进给量指数 $Y_{fp}=0.75$, 工件材料布氏硬度 $HB=200$, 材料硬度指数 $n=2$, 径向切削力系数 $C_{F_p}=1000$, 切削条件系数 $C_y=0.025$ 。试分析计算在只考虑机床刚度的影响时, 一次走刀圆度精度能否达到图样要求?若达不到要求, 可采取何种工艺措施?

显然, 镗短套工件时, 工艺系统的刚度 k_{xt} 只取决于床头和刀架的刚度, 即

$$k_{xt} = \frac{1}{\frac{1}{k_{ct}} + \frac{1}{k_{dj}}} = \frac{k_{ct} \times k_{dj}}{k_{ct} + k_{dj}} = \frac{40\,000 \times 3\,000}{40\,000 + 3\,000} \text{N/mm} = 2\,790 \text{N/mm}$$

本工序误差复映系数为

$$\varepsilon = \frac{\Delta w}{\Delta m} = \frac{C_{F_p} f^{Y_{fp}}}{k_{xt}} = \frac{1\,000 \times 0.05^{0.75}}{2\,790} = 0.037$$

故

$$\Delta w = \varepsilon \times \Delta m = 0.037 \times 0.4 = 0.015 \text{mm}$$

可见, 一次进给达不到要求。

为达到加工精度要求, 可采用多次走刀、减少进给量、提高工艺系统刚度、减小误差复映系数等工艺措施。

3) 工艺系统中其他作用力变化引起受力变形的变化而产生的加工误差

在车床或磨床类机床上加工轴类零件时, 常用单爪拨盘带动工件旋转, 如图4-25所示。转动动力在拨盘上的每一转中不断改变方向, 它在误差敏感的方向的分力有时把工件推向刀具, 使实际切削深度增大; 有时把工件拉离刀具, 使实际切削深度减小, 进而引起工件的加工误差。

对于刚度较差的工件, 若夹紧时施力不当, 使工件在变形状态下加工, 加工完松夹后由于弹性恢复也会出现加工误差。

在工艺系统中, 零部件的自重也会产生变形, 如龙门铣床、龙门刨床刀架横梁的变形, 镗

床镗杆伸长变形等,都会造成加工表面误差,如图4-26所示。

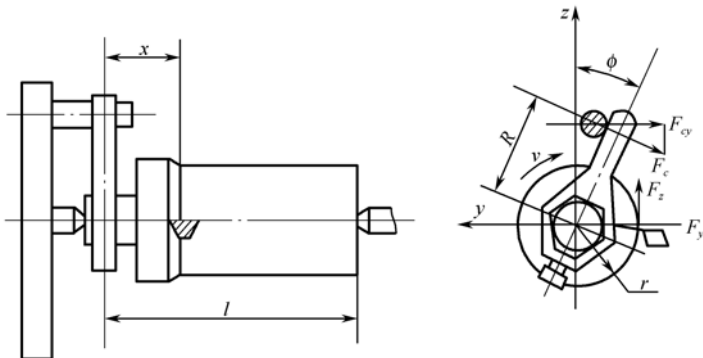


图4-25 单爪拨盘传动引起的加工误差

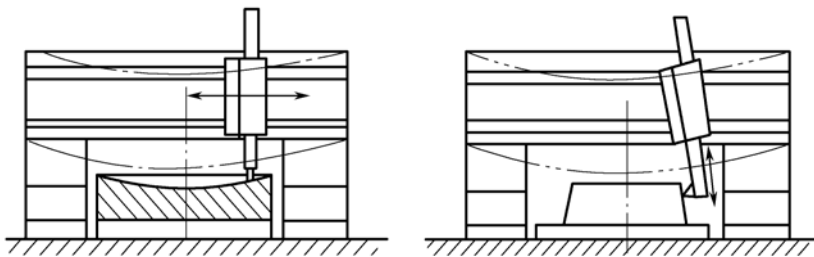


图4-26 机床部件自重引起的横梁变形

总之,工艺系统受力变形产生误差(影响加工精度)的问题是十分复杂的。各误差因素在不同的具体情况下,其影响程度不同。因此,在分析生产中存在的具体加工精度问题时,要分清主次,抓住主要矛盾。

3. 减小工艺系统受力变形的措施

1) 提高接触刚度

由于部件的接触刚度大大低于实体零件本身的刚度,所以提高接触刚度是提高工艺系统刚度的关键。特别是对于使用中的机床设备,提高其连接表面的接触刚度往往是提高机床刚度的最简便、最有效的方法。

通过提高导轨等结合面的刮研质量、形状精度并降低表面粗糙度,都能增加接触面积,有效提高接触刚度。提高锥孔与锥体、顶尖孔与顶尖之间的接触质量,也能使实际接触面积增加。在接触面预加载荷,能消除接触面之间的间隙,增加接触面积,减小受力后的变形量,增大接触刚度。

2) 提高工件的刚度,减少受力变形

在车床上加工细长轴时,工件的刚度差,常用中心架来提高工件的刚度。在转塔车床上加工较短的轴类零件时,为增加刀架刚度,常采用导套、导杆等辅助支承来加强刀架的刚度。

3) 合理装夹工件,减少夹紧变形

若工件自身刚性差,夹紧时应特别注意选择适当的夹紧方法,尤其是在加工薄壁零件时,为了减少加工误差,应使夹紧力均匀分布。例如薄壁套筒装在三爪卡盘上镗孔,夹紧后套筒孔产生弹性变形(如图4-27(a)所示),虽然镗出的孔呈正圆形(如图4-27(b)所示),但松

开三爪卡盘后，薄壁套筒的弹性变形恢复，使孔呈三角棱圆形（如图 4-27（c）所示）。为减少工件变形，使用加开口过渡环（如图 4-27（d）所示）或专用卡爪（如图 4-27（e）所示），使夹紧力在薄壁套筒外均匀分布，从而减少了工件的夹紧变形。由此可知，夹紧变形引起的工件形状误差不仅取决于夹紧力的大小，还与夹紧力的作用点有关。

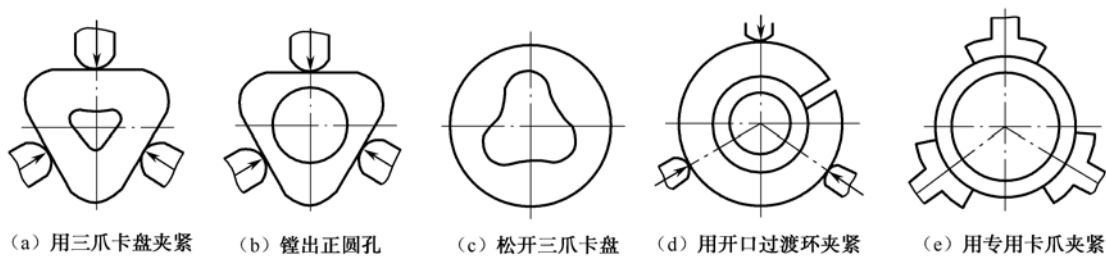


图 4-27 零件夹紧变形引起的误差

4.2.3 工艺系统受热变形对加工精度的影响

1. 概述

在加工过程中，工艺系统的热源主要有两大类：内部热源和外部热源。

切削热是由切削过程中切削层金属的弹性、塑性变形以及刀具与工件、切屑间的摩擦产生的，它由工件、刀具、夹具、机床、切屑、切削液及周围介质传出。在车削时，大量的切削热由切屑带走，传给工件的为 10%~30%，传给刀具的为 1%~5%。孔加工时，大量切屑滞留在孔中，大量的切削热传入工件。磨削时，由于切屑小，带走的热量很少，大部分热量传入工件。

一般都把主切削运动所消耗的能量看成全部转化为切削热，忽略进给运动消耗的能量。因此单位时间内传入工件或刀具的热量 q 可估算为

$$q = F_z \cdot v \cdot K \tag{4-27}$$

式中， F_z 为主切削力，单位为 N； v 为切削速度，单位为 m/s； K 为传入工件或刀具的热量占总切削热的百分比。

摩擦热主要是机床和液压系统中的运动部分产生的，如电动机、轴承、齿轮等传动副、高速运动导轨副、蜗轮蜗杆副、丝杆螺母副、摩擦离合器、液压泵、阀等运动部分产生的摩擦热。摩擦热是机床热变形的主要热源。

外部热源主要来自外部环境，如环境温度、阳光、取暖设备、灯光、人体等。

由于组成工艺系统的各个环节结构、尺寸、材质及受热程度的不同，各个环节的温升不同，产生的变形也不同。这样，使工艺系统各环节的相对位置发生改变，从而产生加工误差。在精密加工中热变形引起的加工误差占总加工误差的 40%~70%；在大型零件的加工和自动化生产中，热变形对加工精度的影响也十分显著。高效、高精度、自动化加工技术的发展，使工艺系统热变形问题变得更为突出，已成为机械加工技术进一步发展的一个重要的研究课题。

2. 工件热变形对加工精度的影响

工件热变形的热源主要是切削热。热变形对加工精度的影响表现为两方面：当工件受热膨

胀均匀时,会引起尺寸大小变化;若是膨胀不均匀,会引起形状的变化。这两方面影响的主次随加工情况不同而异。

对工件的平面进行铣、刨、磨等加工时,工件单侧受热,上下表面温升不等,从而使工件向上凸起,凸起部分被切掉,冷却后,被加工表面呈凹形。

磨削加工中工件热变形对加工精度影响很大。例如,磨削长度为 3000mm 的丝杆,每磨一次温度升高约 3℃,经计算丝杆伸长量为 0.1mm,对于 6 级精度丝杆,螺距累积误差在全长上不允许超过 0.02mm,3℃的温升足以使此项误差超差。

下面以加工盘类和长度较短的销轴、套类零件为例,粗略讨论工件热变形及其对加工精度的影响。此时,切削热沿切削表面圆周较均匀地传入,故一般可近似地看做均匀受热;由于走刀行程不长,可忽视沿工件轴向位置上切削时间有先后的影响,而把工件看做等温体。同时工件的温升一般均远远达不到热平衡,它向周围介质的散热量相对较少,也可不予考虑。因此,其平均温升可估算如下:

$$T_p = \frac{q\tau}{mc} = \frac{F_z v \tau K}{mc} \quad (4-28)$$

式中, τ 为切削时间,单位为 s; m 为工件质量,单位为 kg; c 为工件材料的比热,单位为 J/kg·℃。

由于工件在切削加工时受热膨胀,冷却后尺寸收缩,所以必须在工件冷却后才能测得零件的实际尺寸。如加工后立刻进行测量,必须考虑工件的膨胀量 ΔD :

$$\Delta D = \alpha T_p D \quad (4-29)$$

式中, α 为工件材料线膨胀系数,单位为 1/℃。

例如,在 $\phi 40 \times 40$ 的铸铁工件上钻孔 $\phi 20$,切削用量是 $n=500$ r/min, $f=0.3$ mm/r (铸铁 $\alpha=1.05 \times 10^{-5}$, 密度 $\rho=7570$ kg/m³, $c=470$ J/kg·℃)。

$$\text{切削扭矩 } M = F_z \cdot \frac{D}{2} = \frac{210 D^2 f^{0.8}}{1000} = \frac{210 \times 20^2 \times 0.3^{0.8}}{1000} = 32.06 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{切削时间 } \tau = \frac{60l}{nf} = \frac{60 \times 40}{500 \times 0.3} = 16 \text{ s}$$

$$\text{单位时间传入工件的热量 } q = F_z v K = \frac{2\pi M n K}{60} = \frac{2\pi \times 32.06 \times 500 \times 0.5}{60} = 839.3 \text{ W}$$

(取 $K=0.5$)

$$\text{工件质量 } m = \frac{\pi}{4} (0.04^2 - 0.02^2) \times 0.04 \times 7570 = 0.285 \text{ kg}$$

$$\text{工件平均温升 } T_p = \frac{q\tau}{mc} = \frac{839.6 \times 16}{0.285 \times 470} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{孔径受热扩大量 } \Delta D = \alpha T_p D = 1.05 \times 10^{-5} \times 100 \times 20 = 0.021 \text{ mm}$$

上例工件如果在钻孔后立即镗孔或铰孔,则工件完全冷却后孔径收缩量已与 IT7 级精度的公差值相等,其加工精度就很难保证。为避免工件粗加工时的热变形对精加工的影响,在安排工艺过程时应尽可能把粗精加工分开在两个工序中进行,使粗加工后有足够的冷却时间。

3. 刀具热变形对加工精度的影响

切削加工中传给刀具的切削热所占比例并不大,但是由于刀体小、热容量小,刀具温升可能非常高,其热变形对加工精度的影响有时是不可忽视的。例如,用高速钢车刀切削时,刀刀

部分温升可达 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，刀具伸长量可达 $0.03\sim 0.05\text{mm}$ 。

在车削长轴或在立车上加工大端面时，刀具连续长时间工作，车刀热伸长曲线如图 4-28 曲线所示。其中曲线 A 是车刀连续切削时的热伸长曲线，曲线 B 为切削停止后，刀具温度下降、伸长量减小的曲线。

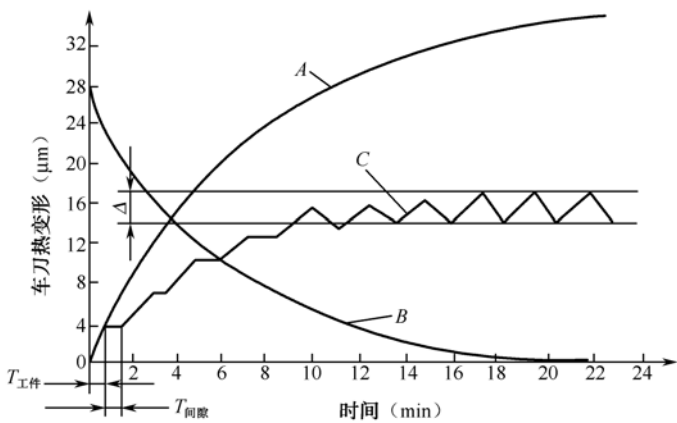


图 4-28 车刀热伸长曲线

由于刀具从常温到热平衡的连续工作过程中逐渐伸长，使加工出的大端面出现平面度误差，加工出的长轴出现圆柱度误差。

在采用调整法加工一批工件时，刀具的受热与冷却是间歇进行的，开始加工的一些零件尺寸会逐渐减小或增大，当达到热平衡后，刀具的热变形在 Δ 范围内波动，对尺寸精度的影响不显著，如图 4-28 中折线 C 所示。

4. 机床热变形对加工精度的影响

不同类型的机床因其结构与工作条件的差异而使热源和变形形式各不相同。磨床的热变形对加工精度影响较大。外圆磨床的主要热源是砂轮主轴的摩擦热及液压系统的发热，而车、铣、钻、镗等机床的主要热源则是主轴箱。主轴箱轴承的摩擦热及主轴箱中油的发热会导致主轴箱及与它相连接部分的床身温度升高。图 4-29 所示为 C620-1 车床的热变形情况，其中图 4-29(a) 所示为温升使主轴提高并倾斜，并使床身凸起；图 4-29(b) 所示为主轴抬高量和倾斜量与运转时间的关系。车床主轴在垂直面内的热变形因为不在加工误差敏感方向，所以对加工精度影响较小。但对于六角车床和自动车床，因为同时有水平刀架和垂直（或倾斜）刀架，所以上述热变形对加工精度影响较大。

5. 控制工艺系统热变形对加工精度影响的基本途径

1) 减少热源的发热和隔离热源

在精加工中，为了减小切削热和降低切削区域温度，应合理选择切削用量和刀具几何参数，并给予充分冷却和润滑。如果粗、精加工在一个工序内完成，粗加工的热变形将影响精加工精度。一般可以在粗加工后停机一段时间使工艺系统冷却，同时还应将工件松开，待精加工时再夹紧。这样就可减少粗加工热变形对精加工精度的影响。当零件精度要求较高时，则粗、精加工宜分开进行。

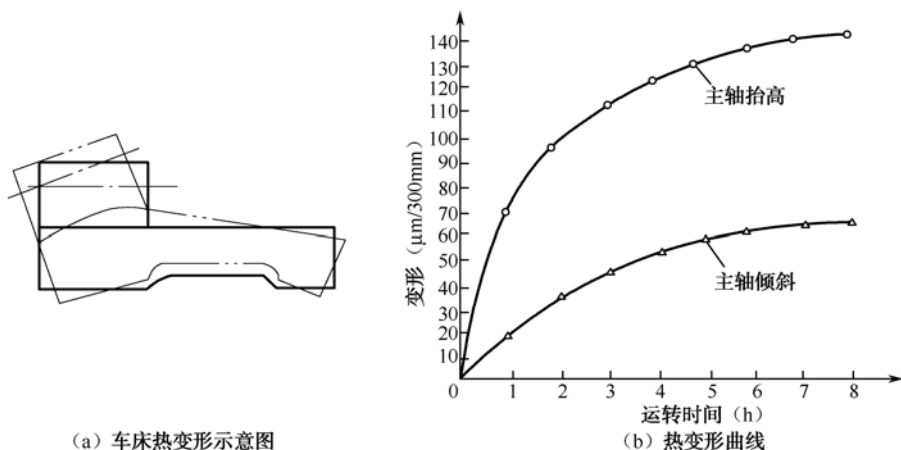


图 4-29 车床的热变形

为了减少工艺系统中机床的发热,凡是有可能从主机中分离出去的热源,如电动机、变速箱、液压系统、冷却系统等最好放置在机床外部,使之成为独立单元。对于不能和主机分离的热源,如主轴轴承、高速运动的导轨副等,则可以从结构、润滑等方面改善其摩擦特性,减少发热,也可用隔热材料将发热部件和机床大件(如床身、立柱等)隔离开来。

对发热量大的热源,如果既不能从机床内部移出,又不便隔热,则可采用强制性风冷、水冷等散热措施。例如,一台坐标镗床的主轴箱采用恒温喷油循环强制冷却后,主轴与工作台之间在垂直方向的热变形减少到 $15\ \mu\text{m}$,且机床运转不到 2h 时就达到热平衡。而不采用强制冷却时,机床运转 6h 后,上述热变形产生了 $190\ \mu\text{m}$ 的位移,而且机床尚未达到热平衡。因此,目前大型数控机床、加工中心机床普遍采用冷冻机对润滑油、切削液进行强制冷却,以提高冷却效果。精密丝杠磨床的母丝杠中则通以冷却液,以减少其热变形。

2) 均衡温度场

图 4-30 所示的立式平面磨床采用热空气加热温升较低的立柱后壁,以均衡立柱前后壁的温升,减小立柱的向后倾斜。图中热空气从电动机风扇排出,通过特设的软管引向立柱的后壁空间。采用这种措施后,磨削平面的平面度误差可降到未采取措施前的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 。

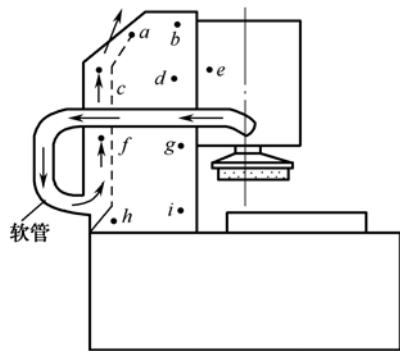


图 4-30 均衡立柱前后壁的温度场

3) 采用合理的机床结构

在变速箱中,将轴、轴承、传动齿轮等对称布置,可使箱壁温升均匀,箱体变形减小。机床大件的结构和布局对机床的热态特性有很大影响。以加工中心机床为例,在热源影响下,单立柱结构会产生较大的扭曲变形,而双立柱结构由于左右对称,仅产生垂直方向的热位移,很容易通过调整的方法予以补偿。

4) 控制环境温度,加速达到热平衡状态

精密机床应安装在恒温车间,其恒温精度一般控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。对于精密机床特别是大型机床,达到热平衡的时间较长。为了缩短这个时间,可以在加工前,使机床做高速空运转,或人为地给机床加热,使机床较快地达到热平衡状态,然后进行加工。

4.2.4 工件残余应力引起的加工误差

残余应力又称内应力，是指在没有外力作用下或去除外力后仍残存在工件内部的应力。残余应力是由于金属内部宏观的或微观的组织发生了不均匀的体积变化而产生的，其外界因素就来自热加工和冷加工。

零件中的残余应力往往处于一种不稳定的平衡状态，在外界某种因素的影响下，它会使内部的组织很容易失去原有的平衡，并达到新的平衡。在这一过程中，内应力重新分布，导致工件变形产生，从而破坏零件原有的精度。

1) 毛坯制造和热处理过程中产生的残余应力

在铸、锻、焊、热处理等加工过程中，由于各部分冷热收缩不均匀以及金相组织转变而引起的体积变化，将会使毛坯内部产生残余应力。毛坯的结构越复杂，各部分的厚度越不均匀，散热条件相差越大，则在毛坯内部产生的残余应力也越大。

具有残余应力的毛坯由于残余应力暂时处于相对平衡的状态，加工时切去一层金属后，就打破了这种平衡，残余应力将重新分布，零件就会产生明显的变形。

例如，图 4-31 所示为一个内外壁厚薄相差较大的铸件在铸造过程中产生残余应力的情形。铸件浇铸后，由于壁 A 和 C 比较薄，容易散热，所以冷却速度较 B 快。当壁 A、C 从塑性状态冷却到了弹性状态时，壁 B 尚处于塑性状态。当 A、C 继续收缩时，B 不阻止其收缩，故不产生残余应力。当 B 也冷却到了弹性状态时，壁 A、C 的温度已降低很多，其收缩速度变得很慢，但这时 B 收缩较快，因而受到 A、C 的阻碍。因此，B 内就产生了拉应力，而 A、C 就产生了压应力，形成相互平衡状态。如果在 A 上开一缺口，A 上的压应力消失，铸件在 B、C 的残余应力作用下，B 收缩，C 伸长，铸件就产生了弯曲变形，直至残余应力重新分布达到新的平衡状态为止。

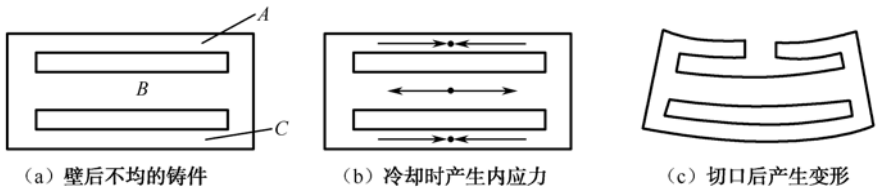


图 4-31 铸件残余应力的形成过程

推广到一般情况，各种铸件都难免发生冷却不均匀而产生残余应力现象，铸件的外表面总比中心部分冷却得快。特别是有些铸件，如铸造后的机床床身，其导轨面和冷却快的地方都会出现压应力。粗加工导轨表面被切去一层后，残余应力就重新分布达到新的平衡，结果使导轨中部下凹（如图 4-32 所示）。

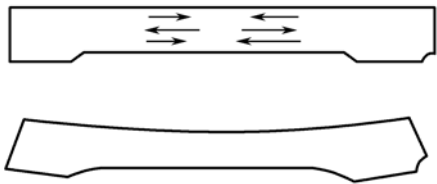


图 4-32 床身因内应力引起的变形

为了克服这种内应力重新分布而引起的变形,特别是对于大型和精度要求高的零件,一般在铸件粗加工后进行时效处理,然后再精加工。

2) 冷校直带来的残余应力

为了纠正细长轴类零件的弯曲变形,有时采用冷校直方法。这种方法是在与变形相反的方向上施加作用力,如图 4-33 (a) 所示,使工件产生反方向弯曲,并产生一定的塑性变形。当工件外层应力超过屈服强度时,其内层应力还未超过弹性极限,故其应力分布情况如图 4-33 (b) 所示。去除外力后,由于下部外层已产生拉伸的塑性变形,上部外层已产生压缩的塑性变形,故里层的弹性恢复受到阻碍。结果上部外层产生残余拉应力,上部里层产生残余压应力;下部外层产生残余压应力,下部里层产生残余拉应力,如图 4-33 (c) 所示。冷校直后虽然弯曲减小了,但内部组织处于不稳定状态,经加工后,又会产生新的弯曲变形。

为了从根本上消除冷校直带来的不稳定的缺点,对于高精度的丝杠(6级以上)根本不允许像普通精度丝杠那样采用冷校直工艺,而是采用加粗的棒料经过多次车削和时效处理来消除内应力。有时可采用热校直来代替冷校直,不但提高了丝杠的质量,还大大提高了生产率。这种热校直工艺是结合工件正火处理进行的,即在正火温度下放在平台上用手动压力机进行校直。

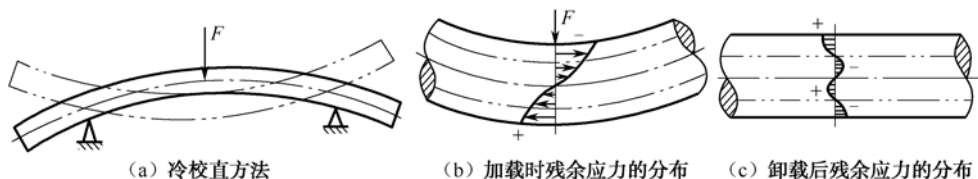


图 4-33 冷校直引起的残余应力

3) 切削加工带来的残余应力

在切削加工中,工件表面在切削力、切削热作用下,也会产生残余应力,详见第 5 章。要减少残余应力,一般可采取下列措施。

1) 增加消除内应力的专门工序

例如,对于铸、锻、焊接件进行退火或回火;零件淬火后进行回火;对精度要求高的零件如床身、丝杠、精密主轴等在粗加工后进行时效处理。常用的时效处理方法有如下几种。

(1) 高温时效:将工件以 3~4h 的时间均匀加热到 500~600℃,保温 4~6h 后以每小时 20~50℃的冷却速度随炉冷却到 100~200℃取出,在空气中自然冷却。高温时效一般适用于毛坯或粗加工后。

(2) 低温时效:将工件均匀加热到 200~300℃,保温 3~6h 后取出,在空气中自然冷却。低温时效一般适用于半精加工后。

(3) 热冲击时效:将加热炉预热到 500~600℃,保持恒温。然后将铸件放入炉内,当铸件的薄壁部分温度升到 400℃左右,厚壁部分因热容量大而温度只升到 150~200℃,及时将铸件取出,在空气中冷却。因为温差而引起的应力场和铸造时产生的残余应力场叠加而抵消,从而达到消除残余应力的目的。热冲击时效耗时少,一般只需几分钟,适用于具有中等应力的铸件。

(4) 振动时效:用激振器或振动台使工件以约 50 Hz 的频率进行振动来消除残余应力。如果以工件的固有频率激振,则效率更高。由于振动时效方便简单,没有氧化皮,所以一般适用于最后精加工前的时效处理。对于某些零件,可用木锤击打的方式进行时效处理。对于一些小工件,还可将它们装在滚筒内,滚筒旋转时工件相互撞击,也可收到消除残余应力的效果。

2) 合理安排工艺过程

例如，粗、精加工分开在不同工序中进行，使粗加工后有一定时间让残余应力重新分布，以减少对精加工的影响。在加工大型工件时，粗、精加工往往在一个工序中完成，这时应在粗加工后松开工件，让工件有自由变形的可能，然后再用较小的夹紧力夹紧工件后进行精加工。再如，焊接时工件先经预热以减少温差，并合理安排焊接顺序，也可减少残余应力的产生。对于精密的零件，在加工过程中不允许进行冷校直（必要时采用热校直）。

3) 合理设计零件结构

在机器零件的结构设计中，应尽量简化结构，增大零件的刚度，使壁厚均匀可减少残余应力的产生。

4.3 保证和提高加工精度的途径

保证零件加工精度的最终目的是保证产品的精度和质量。因此，从毛坯制造到产品装配过程中，都应当注意保证加工精度的问题。

下面结合实例就减小加工误差、保证加工精度的方法予以讨论。

4.3.1 直接减小误差法

这种方法是生产中应用较广的一种方法，它是在查明产生加工误差的原始误差之后，设法对其进行消除或减小。

例如车削细长轴时，为了增加工件的刚度，采用跟刀架，但有时仍难车出高精度的细长轴。究其原因，采用跟刀架虽可减小背向力 F_p ，解决使工件“顶弯”的问题，但没有解决工件在进给力 F_f 作用下的“压弯”问题，如图 4-34（a）所示。压弯后的工件在高速回转中，由于离心力的作用，不但变形加剧，而且产生振动。此外，装夹工件的卡盘和尾架顶尖之间的距离是固定的，切削热引起的工件热伸长受到阻碍，这又增加了工件的弯曲变形。实践证明，采用以下措施可以使鼓形度误差大为改善。

（1）采用反向进给的切削方式，如图 4-34（b）所示，进给方向由卡盘一端指向尾架，进给力 F_f 对工件是拉伸作用，解决了“压弯”问题。

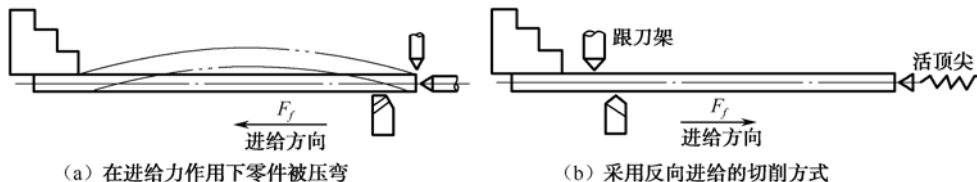


图 4-34 车细长轴的误差原因及采取的措施

（2）反向进给切削时采用大进给量和较大的主偏角车刀，以增大 F_f 力，使工件受强力拉伸作用，而不被压弯。同时可消除振动，使切削过程平稳。

（3）改用具有伸缩性的弹性后顶尖。这样既可避免工件从切削点到尾架顶尖一段由于受压力而弯曲，又使工件在热伸长情况下有伸缩的余地。

(4) 在卡盘一端的工件上车出一个缩颈, 缩颈直径 $d \approx D/2$ (D 为工件坯料直径)。缩颈使工件具有柔性, 可以减小由于坯料弯曲而在卡盘强制夹持下而产生轴心线歪斜的影响。

再如, 在机械加工中, 常遇到薄片类零件 (如摩擦片、阀片、锯片等) 在热处理淬硬后进行磨削, 它们的两个面有相当高的平面度要求。该类零件在磨削前已经过多道机加工工序和热处理工序, 产生了翘曲, 因此磨削时在磁力吸盘的作用下, 虽然被吸平和磨平了, 但卸下吸盘的吸力后它又回复了变形, 结果废品率很高。产生加工误差的实质是工件薄、刚性差, 容易产生夹紧变形。下面以图 4-35 所示摩擦片零件的磨削加工为例, 说明消除该类薄片零件磨削加工的夹紧变形的办法。

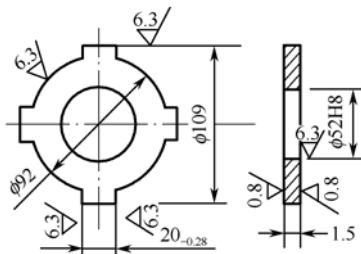


图 4-35 摩擦片

第一种方法是采用弹性夹紧机构, 使工件在自由状态下定位和夹紧。可采用如图 4-36 所示的磨削卡盘来装夹摩擦片进行磨削加工。卡盘体 1 通过支承杆 12、压板 13 和 14 及螺栓螺母等固定在车床的导轨上。转盘 2 的一端被三爪卡盘夹住, 另一端胶合着一块橡皮 3, 工件 (摩擦片) 的孔套在心轴 10 上, 通过弹簧 5 的作用, 三只滚轮 8 将摩擦片压贴在橡皮 3 的表面上。移动调节杆 4 可以调整滚轮 8 的施加压力的位置。由于工件承托在具有弹性和较高摩擦系数的橡皮上, 所以定位是可靠的, 而且在磨削扭矩的作用下也不会打滑。由于工件的后面有弹性橡皮, 它在自由状态下几乎全部面积和橡皮接触。三个滚轮的局部夹紧力和垂直于端面的磨削力都不会引起工件的显著变形。

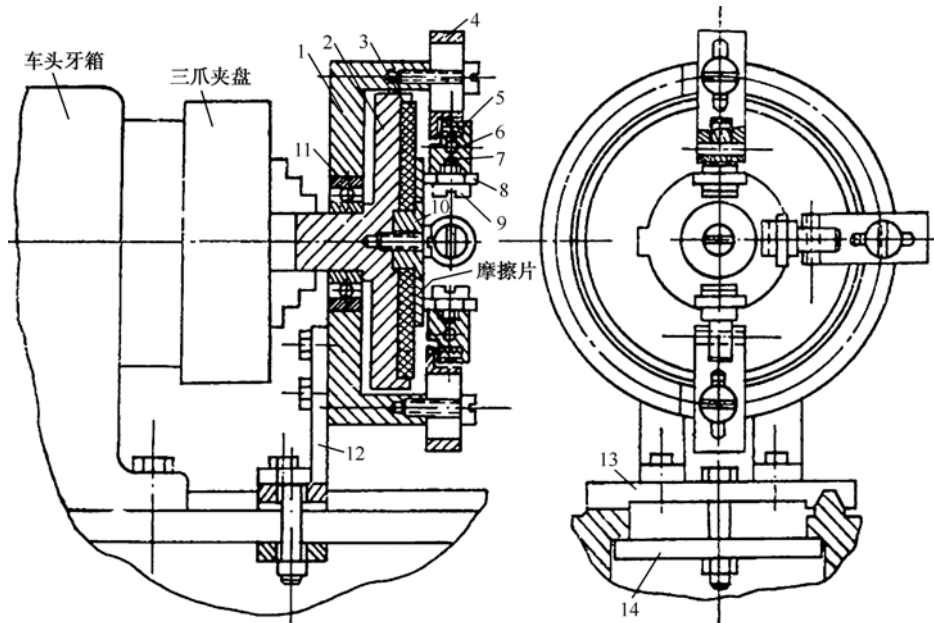


图 4-36 磨削摩擦片的卡盘结构图

图 4-37 所示是采用磁力吸盘夹紧和弹性夹紧两种方式中工件变形状态的比较。用装在车床溜板上的磨头和碗形砂轮对在这种自由状态下固定的工件进行端面磨削, 反复几次就可以得到平面度很高的摩擦片, 当然由于在车床上—件一件地加工, 这种方法的生产率是比较低的, 这是它的不足之处。但是装置的结构简单, 加之适应性好, 因此很适合品种多而批量较小的工厂。

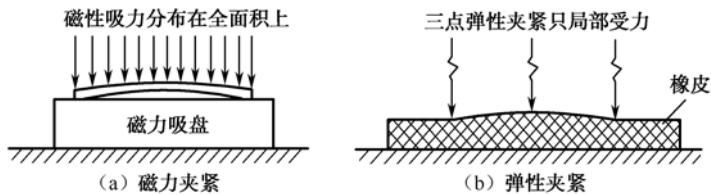


图 4-37 两种夹紧方式的比较

第二种方法则是采用临时性加强工件刚性的办法。例如，采用环氧树脂黏合剂将摩擦片在自由状态下黏结到一块平板上。平板连同工件一起放到磁力吸盘上，磨平工件的上端面。再将工件从平板上取下来，以磨平了的一面放到磁力吸盘上，再磨另一面（如图 4-38 所示）。

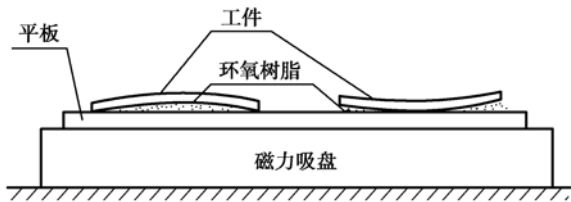


图 4-38 利用环氧树脂增强工件刚性

由于环氧树脂在未硬化前有流动性，它可以填平工件（摩擦片）与平板间的空隙。环氧树脂硬化以后使工件和平板黏结成一体，大大地增强了工件的刚性，在磁力吸引下工件不会产生夹紧变形，为磨削出平直的表面创造了条件。这种黏合的方法带来了一个缺点，就是多了一道黏结和拆开的工序，所以仍然只适合小批生产的场合。

根据上面的思路，可以采取更简便的方法，使生产率能保持较高的水平，就是用厚油脂代替环氧树脂填充在工件和磁力吸盘之间的间隙中，加强了工件的刚性，效果也较好，如图 4-39 所示。

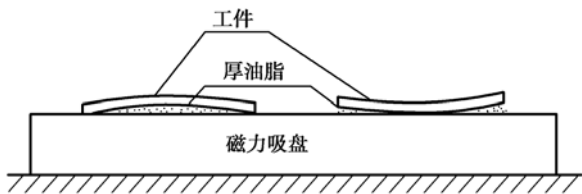


图 4-39 利用厚油脂增强工件刚性

4.3.2 误差补偿法

误差补偿法是人为地造出一种新的误差，去抵消原来工艺系统中固有的原始误差。当原始误差是负值时，人为的误差取正值，反之则取负值，尽量使两者大小相等、方向相反。或者，利用一种原始误差去抵消另一种原始误差，尽量使两者大小相等、方向相反，从而达到减少加工误差、保证加工精度的目的。

例如，用预加载荷法精加工磨床床身导轨，借以补偿装配后受机床有关部件自重的影响而产生的受力变形，以及热变形造成的加工后床身导轨面中凹的加工误差。磨床床身是一种窄长结构，刚度比较差，虽然在加工时床身导轨的各项精度都能达到，但在装上进给机构、操纵箱、

工作台和夹具及工件等后，往往发现床身导轨精度降低。这是因为这些部件自重引起床身变形的缘故。为此，某些磨床厂在加工床身导轨时采取用“配重”代替部件质量，或者先将该部件装好再磨削的办法，使加工、装配和使用条件一致。这样，可使导轨长期保持高的精度。

再如，用校正机构提高丝杠车床传动链精度。在精密螺纹加工中，机床传动链误差将直接反映在被加工工件螺距上，使精密丝杠的加工精度受到一定的限制。为了满足精密丝杠的加工要求，不能采用一味提高传动链中各元件精度的办法，在生产实践中广泛采用误差补偿原理来消除传动链误差。即螺母丝杠螺距有了误差，它就会使刀具进给行程产生或大或小变化，这时，通过一个校正尺使螺母丝杠上螺母产生一个正的或反的附加转动，就可以将误差补偿，以保证被加工丝杠的螺距精度。

4.3.3 误差分组法

误差分组法是当坯件精度太低，引起的定位误差或复映误差太大时，将坯件按其误差大小均分成 n 组，每组坯件的误差就缩小为原来的 $1/n$ ，再按组调整刀具和工件的相对位置以减小坯件误差对加工精度的影响。

例如，某厂采用心轴装夹工件剃齿，齿轮内孔尺寸为 $\phi 25\text{mm}$ ，上偏差 $+0.013\text{mm}$ ，下偏差为 0 ，心轴实际尺寸为 $\phi 25.002\text{mm}$ 。由于配合间隙过大，剃齿后工件齿圈径向跳动超差。为减小配合间隙又不提高加工精度，采用误差分组法，按工件内孔尺寸大小分成 3 组，与相应的心轴配合，见表 4-1，使每组配合间隙在 0.005mm 之内，保证了剃齿加工要求。

表 4-1 尺寸分组

组 号	工件内孔尺寸 (mm)	心轴尺寸 (mm)	配 合 精 度
1	$\phi 25_{0}^{+0.004}$	$\phi 25.002$	± 0.002
2	$\phi 25_{+0.004}^{+0.008}$	$\phi 25.006$	± 0.002
3	$\phi 25_{+0.008}^{+0.013}$	$\phi 25.011$	$+0.002$ -0.003

误差分组的实质就是利用有密切联系的工件或刀具表面的相互比较、相互检查，从中找出它们之间的差异，然后再进行相互修正加工或互为基准的加工，使被加工表面原有的误差不断缩小和平均化。对配偶件的表面，如伺服阀的阀套和阀芯、精密丝杆与螺母采用配研的方法，实质上就是把两者的原始误差不断缩小，互为基准加工，最终使原始误差均化到两个配偶件上。在生产中，许多精密基准件的加工（如平板、直尺、角规、分度盘的各个分度槽等）都采用误差分组的方法。

4.3.4 误差转移法

误差转移法就是把原始误差从误差敏感方向转移到误差的非敏感方向。例如，转塔车床的转位刀架，其分度、转位误差将直接影响工件有关表面的加工精度。如果改变刀具的安装位置，使分度转位误差处于加工表面的切向，即可大大减小分度转位误差对加工精度的影响。如图 4-40 所示，调整转塔车床的刀具时，采用“立刀”安装法，把刀刃的切削基面放在垂直平

面内。刀架转位时的转位误差转移到了工件内孔加工表面的切线方向，由此而产生的加工误差非常微小，从而提高加工精度。

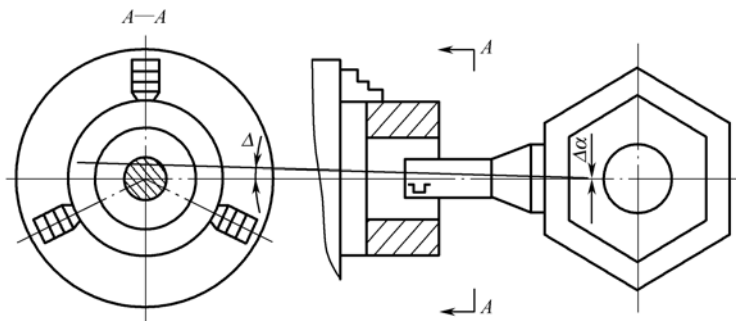


图 4-40 转塔车床的“立刀”安装法

图 4-41 所示为利用镗模进行镗孔，主轴与镗杆浮动连接。这样可使镗床的主轴回转误差对镗孔精度不产生任何影响，镗孔精度完全由镗模来保证。

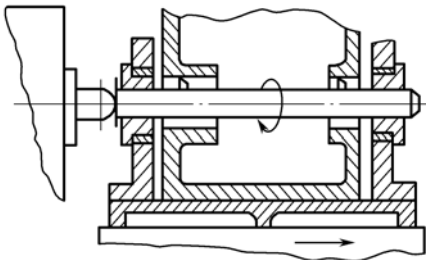


图 4-41 利用镗模转移机床误差

4.3.5 “就地加工”达到最终精度

“就地加工”的办法就是把各相关零件、部件先行装配，使它们处于工作时要求的相互位置，然后就地进行最终加工。“就地加工”的目的在于消除机器或部件装配后的累积误差。

“就地加工”的实例很多，如六角转塔车床的制造中，为保证转塔上六个安装刀架的孔的中心与机床主轴回转轴线的重合度，以及孔的端面与主轴回转轴线的垂直度，在转塔装配到车床床身后，再在主轴上装镗杆和径向进给小刀架，对转塔上的孔和端面进行最终加工。此外，普通车床上对花盘平面或软爪夹持面的修正、龙门刨床上对工作台面的修正等都属于“就地加工”。

4.3.6 主动测量与闭环控制

主动测量是指加工过程中随时测量出工件实际尺寸（形状、位置精度），根据测量结果控制刀具与工件的相对位置。这样，工件尺寸的变动始终在自动控制之中。

在数控机床上，一般都带有对各个坐标移动量的检测装置（如光栅尺、感应同步器）。检测信号作为反馈信号输入控制装置，实现闭环控制，以确保运动的准确性，从而提高加工精度。

4.4 加工误差的综合分析

研究加工精度的方法有如下两种。

(1) 单因素分析法: 即研究某一确定因素对加工精度的影响。为简单起见, 研究时一般不考虑其他因素的作用。通过分析计算, 或测试、试验, 得出该因素与加工误差间的关系。前文对影响加工精度的各种主要因素的分析方法侧重于单因素分析法。

(2) 统计分析法: 以生产中一批工件的实测结果为基础, 运用数理统计方法进行数据处理, 用于控制工艺过程的正常进行。当发生质量问题时, 可以从中判断误差的性质, 找出误差出现的规律, 以指导我们解决有关的加工精度问题。

在生产实际中, 影响加工精度的因素往往错综复杂, 有时仅用单因素分析很难分析计算出某一工序的加工误差, 这时需要运用数理统计的方法对加工误差进行综合分析, 从中找出误差出现的规律和解决问题的途径。

一般情况下, 这两种方法常常结合起来应用。先用统计分析法寻找误差的出现规律, 初步判断产生加工误差的可能原因; 然后运用单因素分析法进行分析、试验, 以便迅速有效地找出影响加工精度的主要原因。

4.4.1 加工误差的性质

从加工一批工件时所出现的误差规律来看, 加工误差可以分为系统性误差和随机性误差两大类。

1. 系统性误差

(1) 常值系统性误差: 在顺序加工一批工件时, 误差的大小和方向保持不变者, 称为常值系统性误差。例如, 原理误差和机床、刀具、夹具的制造误差, 一次调整误差以及工艺系统因受力点位置变化引起的误差等都是常值系统性误差。

(2) 变值系统性误差: 在顺序加工一批工件时, 误差的大小和方向呈有规律变化者, 称为变值系统性误差。例如, 由于刀具磨损引起的加工误差, 机床、刀具、工件受热变形引起的加工误差等都属于变值系统性误差。

2. 随机性误差

在顺序加工一批工件时, 误差的大小和方向呈无规律变化者, 称为随机性误差。例如, 加工余量不均匀或材料硬度不均匀引起的毛坯误差复映, 定位误差以及由于夹紧力大小不一引起的夹紧误差, 多次调整误差, 残余应力引起的变形误差等都属于随机性误差。

误差性质不同, 其解决的途径也不一样。对于常值系统性误差, 在查明其大小和方向后, 采取相应的调整或检修工艺装备, 以及用一种常值系统性误差去补偿原来的常值系统性误差, 即可将误差消除或控制在公差范围之内。对于变值系统性误差, 在查明其大小和方向随时间变化的规律后, 可采用自动连续补偿或自动周期补偿的方法予以消除。对于随机性误差, 从表面上看似没有规律, 但是应用数理统计的方法可以找出一批工件加工误差的总体规律, 查出产

生误差的根源，在工艺上采取措施来加以控制。

在生产中，误差性质的判别应根据工件的实际加工情况决定。在不同的生产场合，误差的表现性质会有所不同，原属于常值系统性的误差有时会变成随机性误差。例如，对一次调整中加工出来的工件来说，调整误差是常值误差，但在大量生产中一批工件需要经多次调整，则每次调整时的误差就是随机误差了。

4.4.2 加工误差的统计分析

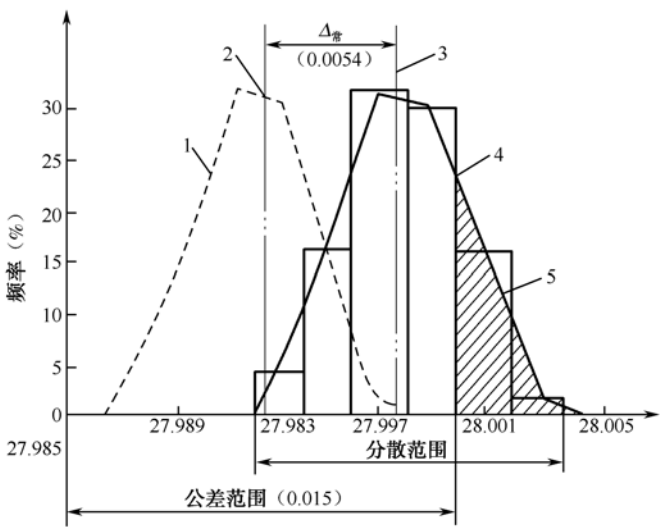
常用的统计分析方法有两种：分布曲线法和点图法。

1. 分布曲线法

1) 实际分布曲线

用调整法加工出的一批工件，尺寸总是在一定范围内变化，这种现象称为尺寸分散。尺寸分散范围就是这批工件最大和最小尺寸之差。如果将这批工件的实际尺寸测量出来，并按一定的尺寸间隔分成若干组，然后以各个组的尺寸间隔（组距）为底，以频数（同一间隔组的零件数）或频率（频数与该批零件总数之比）为高作出若干矩形，此图即为直方图。如果将每个区间的中点（中心值）连成折线，即为分布折线图。当所测零件数量增多，尺寸间隔很小时，此折线便非常接近一条曲线，这就是实际分布曲线。

图 4-42 所示为一批 $\phi 28_{-0.015}^0 \text{ mm}$ 的活塞销孔镗孔后孔径尺寸的直方图和分布折线图，它是根据表 4-2 中的数据绘制的。取在一次调整后加工出来的工件 100 个，经测量得到最大孔径为 $\phi 28.004 \text{ mm}$ ，最小孔径为 $\phi 27.992 \text{ mm}$ ，取 0.002 mm 作为尺寸间隔进行分组，统计每组的工件数，将所得的结果列于表 4-2。



1—理论分布曲线；2—公差范围中心（27.9925）；3—分散范围中心（27.9979）；4—实际分布位置；5—废品区

图 4-42 活塞销孔直径尺寸分布图

表 4-2 活塞销孔直径频数统计表

组别 <i>k</i>	尺寸范围 (mm)	组中心值 <i>x</i> (min)	频数 (<i>m</i>)	频率 (<i>m/n</i>)
1	27.992~27.994	27.993	4	4/100
2	27.994~27.996	27.995	16	16/100
3	27.996~27.998	27.997	32	32/100
4	27.998~28.000	27.999	30	30/100
5	28.000~28.002	28.001	16	16/100
6	28.002~28.004	28.003	2	2/100

由图可以看出：尺寸分散范围(28.004~27.992=0.012mm)小于公差带宽度($T=0.015\text{mm}$)，表明本工序能满足加工精度要求。

部分工件超出公差范围(阴影部分)成为废品，究其原因 是尺寸分散中心(27.9979mm)与公差带中心(27.9925)不重合，存在较大的常值系统性误差(常_常=0.0054mm)，如果设法消除系统性误差使尺寸分散中心与公差带中心重合，这批工件就全部合格，即镗孔时，将镗刀伸出量调短些，消除本工序常值系统性误差，使全部尺寸都落在公差带内。

2) 正态分布曲线

大量实践表明，如果工艺系统不存在系统性误差，只存在随机性误差，则被加工零件的尺寸按正态规律分布；若工艺系统还存在常值系统性误差，则工件尺寸的分布曲线不变，只是其位置沿工件尺寸坐标轴(x 轴)发生平移，当工艺系统存在变值系统性误差，工件尺寸的分布曲线不再是正态分布，但有时可以认为是若干个正态分布曲线的叠加，因此可以通过分析工件尺寸的正态分布曲线来研究加工误差的性质。

正态分布曲线如图 4-43 所示。

正态分布曲线数学关系式为

$$\Phi(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

(4-30)

式中， $\Phi(x)$ 为概率密度，工件分布在单位尺寸宽度上的概率； x 为工件尺寸； \bar{x} 为工件尺寸的平均值，

$$\bar{x}=\sum_{i=1}^n x_i/n;\sigma \text{ 为均方根误差, } \sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i-\bar{x})^2/n};n$$

为工件样本总数(n 应足够多，如 100~200)。

正态分布曲线下所包含的面积代表了全部工件，即 100%。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}dx=1$$

(4-31)

从 \bar{x} 到任意一点 x 间曲线下的面积为工件尺寸从 \bar{x} 到 x 间出现的频率 F ：

$$F=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{\bar{x}}^xe^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}dx$$

(4-32)

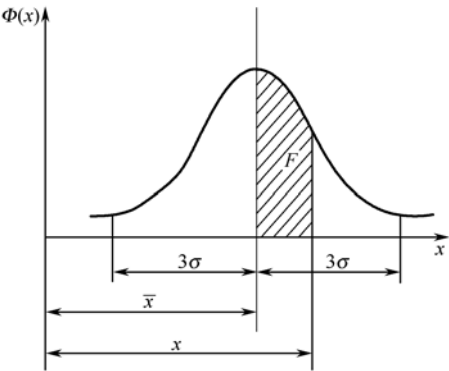


图 4-43 正态分布曲线

为计算方便，令则 $\frac{x-\bar{x}}{\sigma}=z$ ，

$$F=\Phi(z)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int e^{-\frac{z^2}{2}}dz$$

(4-33)

各种不同的 z 值的函数 $\Phi(z)$ 值见表 4-3。

表 4-3 $\Phi(z)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int e^{-\frac{z^2}{2}}dz$ 之值

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0.01	0.0040	0.17	0.0675	0.33	0.1293	0.49	0.1879	0.80	0.2881	1.30	0.4032	2.20	0.4861
0.02	0.0080	0.18	0.0714	0.34	0.1331	0.50	0.1915	0.82	0.2939	1.35	0.4115	2.30	0.4893
0.03	0.0120	0.19	0.0753	0.35	0.1368	0.52	0.1985	0.84	0.2995	1.40	0.4192	2.40	0.4918
0.04	0.0100	0.20	0.0793	0.36	0.1406	0.54	0.2054	0.86	0.3051	1.45	0.4265	2.50	0.4938
0.05	0.0199	0.21	0.0832	0.37	0.1443	0.56	0.2123	0.88	0.3106	1.50	0.4332	2.60	0.4953
0.06	0.0239	0.22	0.0871	0.38	0.1480	0.58	0.2190	0.90	0.3159	1.55	0.4394	2.70	0.4965
0.07	0.0279	0.23	0.0910	0.39	0.1517	0.60	0.2257	0.92	0.3212	1.60	0.4452	2.80	0.4974
0.08	0.0319	0.24	0.0948	0.40	0.1554	0.62	0.2324	0.94	0.3264	1.65	0.4505	2.90	0.4981
0.09	0.0359	0.25	0.0987	0.41	0.1591	0.64	0.2389	0.96	0.3315	1.70	0.4554	3.00	0.49865
0.10	0.0398	0.26	0.1023	0.42	0.1628	0.66	0.2454	0.98	0.3365	1.75	0.4599	3.20	0.49931
0.11	0.0438	0.27	0.1064	0.43	0.1664	0.68	0.2517	1.00	0.3413	1.80	0.4641	3.40	0.49966
0.12	0.0478	0.28	0.1103	0.44	0.1700	0.70	0.2580	1.05	0.3531	1.85	0.4678	3.60	0.499841
0.13	0.0517	0.29	0.1141	0.45	0.1772	0.72	0.2642	1.10	0.3643	1.90	0.4713	3.80	0.499928
0.14	0.0557	0.30	0.1179	0.46	0.1776	0.74	0.2703	1.15	0.3749	1.95	0.4744	4.00	0.499968
0.15	0.0596	0.31	0.1217	0.47	0.1808	0.76	0.2764	1.20	0.3849	2.00	0.4772	4.50	0.499997
0.16	0.0636	0.32	0.1255	0.48	0.1844	0.78	0.2823	1.25	0.3944	2.10	0.4821	5.00	0.49999997

正态分布曲线具有以下特征：

（1）曲线呈钟形，中间高，两边低，曲线以 $x=\bar{x}$ 直线左右对称，靠近分散中心的工件尺寸出现的概率大，占大多数，尺寸远离工件分散中心出现的概率较小，尺寸大于 \bar{x} 和小于 \bar{x} 的概率相等。

（2） σ 是表示正态分布曲线形状的参数，如图 4-44 所示， σ 越大，则工件尺寸越分散，加工精度越低； σ 越小，则工件尺寸集中，加工精度高。

（3）分布曲线与横坐标所围成的面积包括全部零件数（100%），故其面积等于 1，其中 $x-\bar{x}=\pm3\sigma$ 范围内的面积占 99.73%，即 99.73% 的工件尺寸落在 $\pm3\sigma$ 的范围，落在 $\pm3\sigma$ 范围之外的工件可以忽略不计，一般都取正态分布曲线范围为 $\pm3\sigma$ （或 6σ ）。

6σ 的概念在研究加工误差问题时应用很广，是一个很重要的概念。 6σ 的大小代表了某一加工方法在规定的加工条件（毛坯余量、切削用量、正常的机床、夹具和刀具等）下所能达到的加工精度。一般情况下，应使公差带的宽度 T 和均方根误差 σ 之间具有如下关系：

$$T\geq6\sigma$$

(4-34)

但考虑到变值系统性误差(如刀具磨损)及其他因素的影响,总是使公差带的宽度大于 6σ 。刀具磨损会使分布曲线的位置移动及 σ 逐渐增大。在外圆加工中,开始加工时,应使尺寸分散范围接近公差带的下限;在孔加工中,开始加工时,应使尺寸分散范围接近公差带的上限。这样,在刀具磨损过程中,工件的尺寸分散范围逐渐向上限(外圆加工)或向下限(孔加工)移动,可以在较长加工时间内保持工件尺寸不超出公差带。

(4) 曲线分布中心 \bar{x} 改变时,整个曲线将沿 x 轴平移,但曲线的形状保持不变,如图 4-45 所示,这就是常值系统性误差影响的结果。

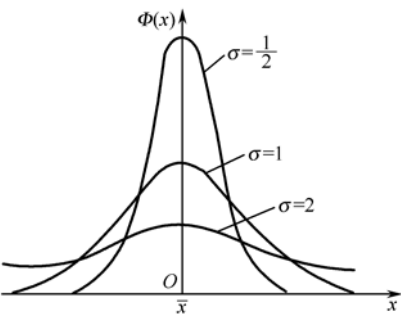


图 4-44 正态分布曲线的性质

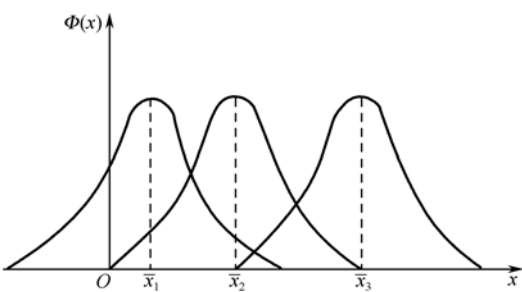


图 4-45 σ 不变时 \bar{x} 使分布曲线移动

正态分布曲线主要应用在以下场合:

- (1) 计算合格率和废品率。正态分布曲线与横坐标之间所包含的面积代表一批零件的总数 100%。如果尺寸分散范围大于零件的公差 T , 则有废品产生。
- (2) 判断加工误差的性质。如果加工过程中没有变值系统性误差的影响, 那么其尺寸分布应符合正态分布, 这是判别加工误差性质的基本方法, 如果尺寸分散中心与公差带中心重合, 则说明不存在常值系统性误差, 若不重合则两中心之间的距离即常值系统性误差。如果实际尺寸与正态分布有较大出入, 说明存在变值系统性误差, 可根据图 4-45 所示来判断变值系统性误差的类型。

(3) 判断工序的工艺能力能否满足加工精度的要求。所谓工艺能力, 是指工序处于稳定状态时, 加工误差正常波动的幅度, 可以用工序的尺寸分散范围来表示其工艺能力, 大多数加工工艺的分布都接近正态分布, 而正态分布的尺寸分散范围是 6σ , 故一般工艺能力取 6σ 。因此, 工艺能力能否满足加工精度要求, 可以用工序能力系数 C_p 来判断:

$$C_p=T/6\sigma$$

(4-35)

根据工艺能力系统的大小, 可将工艺能力分为 5 级, 见表 4-4。

表 4-4 工艺能力等级

工艺能力系数 C_p	工艺等级	工艺能力判断	工艺能力系数 C_p	工艺等级	工艺能力判断
$C_p>1.67$	特级	工艺能力很充分	$0.67<C_p\leq 1.00$	三级	工艺能力不足
$1.33<C_p\leq 1.67$	一级	工艺能力足够	$C_p\leq 0.67$	四级	工艺能力极差
$1.00<C_p\leq 1.33$	二级	工艺能力勉强			

一般情况下, 工序能力不应低于二级, 即 $C_p>1$ 。必须指出, $C_p>1$ 只说明该工序的工序能力足够, 加工中是否会出废品还要看调整得是否正确。如果加工中有常值系统误差, Δ 就与公差带中心位置 A_M 不重合, 那么只有当 $C_p>1$, 且 $T>6+2|\Delta-A_M|$ 时才不会出现不合格品。如果 $C_p<1$,

那么不论怎样调整,不合格品总是不可避免的。

工件实际分布的情况,有时并不近似于正态分布,而是出现非正态分布。例如,加工中刀具或砂轮的尺寸磨损比较快而无自动补偿,工件尺寸的实际分布会出现平顶分布,如图 4-46 (a) 所示;如果将在两台机床上分别加工出的工件混在一起测定,尽管每台机床加工的零件都是按正态分布的,但由于两台机床的工件平均尺寸及工件数可能不同,于是分布曲线是如图 4-46 (b) 所示的双峰曲线;用试切法加工时,由于操作者主观上存在宁可返修也不要报废的思想,也往往出现尺寸不对称分布,如图 4-46 (c) 所示。

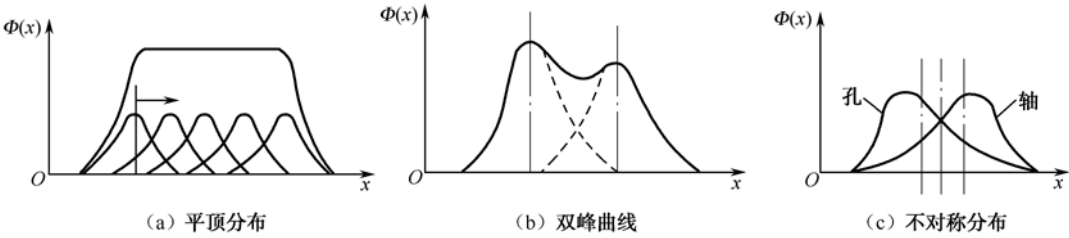


图 4-46 非正态分布

对于非正态分布的加工误差,在计算出均方根 σ 值后,就不能以 $\pm 3\sigma$ 作为其分散范围。根据数理统计理论的数学分析,非正态分布的分散范围,应将 6σ 除以相对分布系数 K , K 值的大小与分布曲线的形状有关。几种典型分布曲线的 K 值可在表 1-19 中查出。

采用分布曲线法分析加工误差属于事后分析,不能反映误差的变化趋势。另外,加工中随机性误差和系统性误差同时存在,由于分析没有考虑工件加工的先后顺序,很难把随机性误差与变值系统性误差区分开。由于必须等一批工件加工完毕后才能得出分布情况,所以不能在加工过程中提供控制工艺过程的资料。

下面给出两个正态分布曲线法的应用实例。

【例 4-1】 在两台相同自动车床上加工 1000 件圆柱销的外圆,直径要求 $\phi 11\pm 0.02$,第一台加工 500 件,尺寸按正态分布,平均值 $\bar{x}_1=11.005$, $\sigma_1=0.04$,第二台加工 500 件,尺寸也按正态分布,其平均值 $\bar{x}_2=11.015$, $\sigma_2=0.0025$ 。试在同一图上画出两台机床加工的两批工件的尺寸分布图,并指出哪台机床的加工精度高,比较两台机床的废品率。

(1) 依题意画图,如图 4-47 所示。

(2) 比较两台机床的精度。

因为 $6\sigma_1=6\times 0.04=0.24>6\sigma_2=6\times 0.0025=0.015$, 故第二台精度高。

(3) 求第一台的废品率。

由图 4-47 可知,第一台机床加工的圆柱销,其直径全部落在公差带内,故无废品。

(4) 求第二台的废品率。

第二台机床加工的圆柱销,有部分落在公差带外,成为可修复废品。

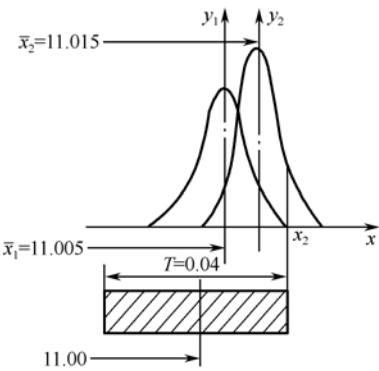


图 4-47 圆柱销外圆直径分布

由 $\frac{x_2 - \bar{x}_2}{\sigma_2} = \frac{11.02 - 11.015}{0.0025} = 2$, 查表 4-3 可以得到 $\Phi(2)=0.4772$ 。

故 废品率 $=0.5-0.4772=2.28\%$

从图可知,第二台机床产生的废品主要原因是刀具调整不当,使得一批工件尺寸分布中心偏大于公差带中心,从而产生可修废品。改进的办法是对第二台机床的车刀重新调整,使之再进刀 $= (11.015-11)/2=0.0075\text{mm}$ 为宜。

【例 4-2】 车削一批轴的外圆,其尺寸要求为 $\phi 20_{-0.1}^0$,若此工序尺寸按正态分布,其 $\sigma=0.025$,公差带中心小于曲线中心,其偏移量为 0.03。要求绘制工件的分布曲线,并表示出该批工件的常值系统性误差和随机性误差;计算合格率及废品率;计算工艺能力系数 C_p 。

(1) 依题意绘图,如图 4-48 所示。

$6\sigma=6\times 0.025=0.15$,即其常值系统性误差为 0.03,随机性误差为 0.15。

(2) 计算合格率及废品率。

曲线左半部分全部落在公差范围内,故 $F_{左}=50\%$ 。

由于 $z_{右}=\frac{20-19.98}{0.025}=0.8$,故 $F_{右}=0.2881$ 。

合格率 $=F_{左}+F_{右}=0.5+0.2881=78.81\%$

废品率 $=1-\text{合格率}=1-0.7881=21.19\%$

(3) 求工艺能力系统 C_p 。

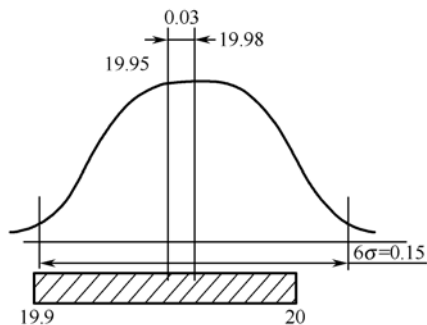


图 4-48 外圆直径分布曲线图

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} = \frac{0.1}{6 \times 0.025} = 0.67$$

工艺能力很差,必须改进。

2. 点图法

用点图来评价工艺过程稳定性采用的是顺序样本,样本是由工艺系统在一次调整中,按顺序加工的工件组成。这样的样本可以得到在时间上与工艺过程运行同步的有关信息,反映加工误差随时间变化的趋势;而分布曲线采用的是随机样本,不考虑加工顺序,而且是对加工好的一批工件有关数据处理后才能做出分布曲线。因此,采用点图法可以消除分布曲线法的缺陷。

1) 点图的形式

(1) 个值点图。按照加工的先后顺序逐个测量一批工件尺寸,以横坐标代表工件的加工顺序,以纵坐标代表工件的尺寸(或误差),所得到的曲线图即为个值点图,如图 4-49 所示。

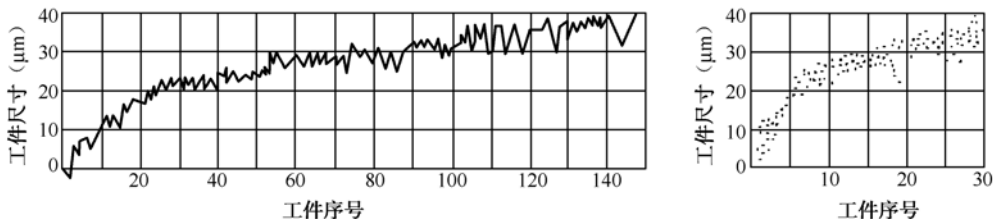


图 4-49 个值点图

假设把点图的上下极限点包络在两根平滑曲线内,并作出其平均值的曲线,如图 4-50 所示,就能较清楚地提示加工过程中各种误差的性质及其变化趋势,平均值曲线 OO' 表示每一瞬

时分散中心的变化情况，反映了变值系统性误差的变化规律，其始点 O 则可看出是常值系统性误差的影响，上下限曲线 AA' 和 BB' 间的宽度表示尺寸分散范围，即反映了随机性误差大小。

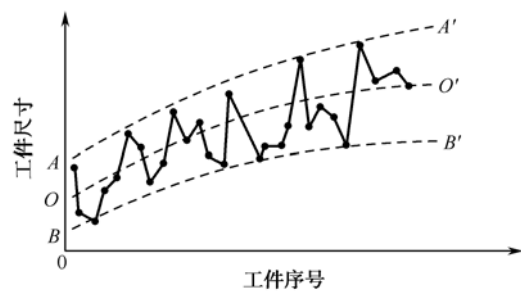


图 4-50 个值点图上反映的误差变化趋势

(2) $\bar{x}-R$ 点图。为了能直接反映出变值系统性误差和随机性误差随时间变化的趋势，实际生产中常采用样组点图代替个值点图，最常用的是 $\bar{x}-R$ 点图（平均值-极差点图），它是将一批工件的尺寸按加工顺序分为 k 组，每组有 m 个工件，将每组工件误差的平均值标在点图（ \bar{x} 图）上，同时把每一组的最大尺寸与最小尺寸之差画在另一张点图（ R 图）上，由此可清楚地了解到尺寸分散及变化情况，如图 4-51 所示。由于 \bar{x} 图在一定程度上代表了瞬时的分散中心，故 \bar{x} 点图可以反映系统性误差的变化趋势； R 图在一定程度上代表了瞬时的尺寸分散范围， R 点图可反映出随机性误差及其变化趋势。但单独的 \bar{x} 和 R 图均不能全面反映加工误差情况，必须结合起来应用。

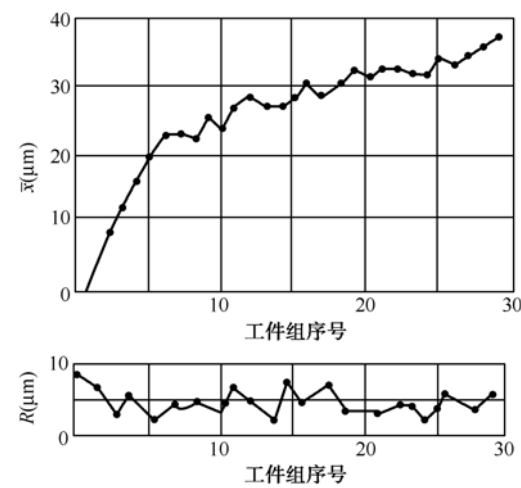


图 4-51 $\bar{x}-R$ 点图

任何一批零件的加工尺寸都有波动性，这样平均值 \bar{x} 、极差值 R 也具有波动性，如果加工误差主要是随机性误差且系统性误差的影响很小，那么这种波动属于正常波动，加工工艺是稳定的。假如加工中存在着影响较大的变值系统性误差或随机性误差的大小有明显的变化，说明加工工艺是不稳定的。为了判断工艺过程的稳定与否，需要在 $\bar{x}-R$ 图上加控制线，控制线是用来判断工艺是否稳定的界线。若尺寸在控制线内，则工艺稳定；若尺寸超出控制线，但仍在公差带内，说明零件合格，但工艺系统有不稳定因素；若尺寸超出公差带，说明已经出现废品，工艺不可行。

\bar{x} 图的中心线

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{x}_i \tag{4-36}$$

R 图的中心线

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{R}_i \tag{4-37}$$

\bar{x} 图的上控制线

$$\bar{X}_s = \bar{\bar{X}} + A\bar{R} \tag{4-38}$$

\bar{x} 图的下控制线

$$\bar{X}_x = \bar{\bar{X}} - A\bar{R} \tag{4-39}$$

R 图的上控制线

$$R_s = D\bar{R} \tag{4-40}$$

R 图的下控制线为零线。

系数 A 、 D 的值见表 4-5。

表 4-5 A 与 D 的系数表

每组个数 m	3	4	5	6
A	1.023	0.729	0.577	0.483
D	2.574	2.282	2.115	2.004

2) 点图法的应用

点图法是全面质量管理中用以控制产品加工质量的主要方法之一，在实际生产中应用广泛，反映了加工顺序。它真实反映了系统性误差和随机性误差的大小及其变化规律，区分各种误差的性质。

点图分析法主要用于工艺验证、分析加工误差和加工过程的质量控制。工艺验证的目的是判定某工艺是否稳定地满足产品的加工质量要求。其主要内容是通过抽样调查，确定其工艺能力和工艺能力系数，并判别工艺过程是否稳定。在点图上做出平均线和控制线后，就可根据图中点的情况来判别工艺过程是否稳定（波动状态是否属于正常），表 4-6 列出了正常波动与异常波动的标志判别。

表 4-6 正常波动与异常波动的标志

正 常 波 动	异 常 波 动
(1) 没有点子超出控制线	(1) 有点子超出控制线
(2) 大部分点在平均线上下波动，小部分在控制线附近	(2) 点子密集在平均线上下附近
(3) 点子没有明显的规律性	(3) 点子密集在控制线附近
	(4) 连续 7 点以上出现在平均线一侧
	(5) 连续 11 点中有 10 点出现在平均线一侧
	(6) 连续 14 点中有 12 点以上出现在平均线一侧
	(7) 连续 17 点中有 14 点以上出现在平均线一侧
	(8) 连续 20 点中有 16 点以上出现在平均线一侧
	(9) 点子有上升或下降倾向
	(10) 点子有周期性波动

必须指出，工艺过程稳定性与是否出废品是两个不同的概念。工艺的稳定性用 $\bar{x}-R$ 图判断，而工件是否合格则用公差衡量，两者之间没有必然的联系。

下面以在自动车床上加工直径为 $\phi 12 \pm 0.013\text{mm}$ 的销轴工件为例，说明工艺验证的方法和步骤。

(1) 抽样测量。按照加工顺序和一定的时间间隔随机地抽取 5 件为一组，共抽取 20 组。在千分比较仪上测量，比较仪按 $\phi 11.987\text{mm}$ 调整零点，测量数据列于表 4-7 中，单位为 μm 。

图 4-7 $\bar{x}-R$ 图记录表

样组号	样件测量值					\bar{x}	R
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	28	20	28	14	14	20.8	14
2	20	15	20	20	15	18	5
3	8	3	15	18	18	12.4	15
4	14	15	15	15	17	15.2	3
5	13	17	17	17	13	15.4	4
6	20	10	14	15	19	15.6	10
7	10	15	20	10	13	15.4	10
8	18	18	20	25	20	20.4	7
9	12	8	12	15	18	13	10
10	10	5	11	15	9	10	10
11	16	21	14	15	16	16.4	7
12	16	17	14	15	15	15.4	3
13	12	12	10	8	12	10.8	4
14	10	10	7	18	15	13.6	11
15	14	15	18	24	10	16.2	14
16	19	18	13	14	24	17.6	11
17	28	25	20	23	20	23.2	8
18	18	17	25	28	21	21.8	11
19	20	21	19	21	30	22.2	11
20	18	28	22	18	20	21.2	10

(2) 计算 $\bar{x}-R$ 图控制线。

\bar{x} 图的中心线： $\bar{X} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{x}_i = 16.73 \mu\text{m}$

R 图的中心线： $\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_i = 8.9 \mu\text{m}$

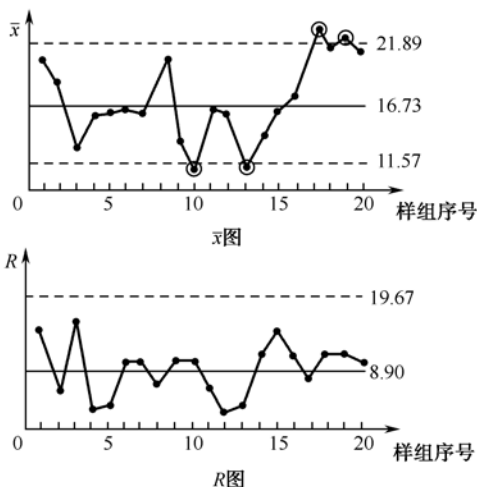
\bar{x} 图的上控制线： $\bar{X}_s = \bar{X} + A\bar{R} = 21.89 \mu\text{m}$

\bar{x} 图的下控制线： $\bar{X}_x = \bar{X} - A\bar{R} = 11.57 \mu\text{m}$

R 图的上控制线： $R_s = D\bar{R} = 19.67 \mu\text{m}$

(3) 根据以上结果作出 $\bar{x}-R$ 图，如图 4-52 所示。

(4) 判断工艺过程稳定性。由图 4-52 可以看出，有 4 个点越出控制线，表明工艺过程不稳定，应查找出原因，并加以解决。

图 4-52 销轴的 $\bar{x}-R$ 图

点图可以提供该工序中误差的性质和变化情况 etc 工艺资料, 因此可用来估计工件加工误差的变化趋势, 并据此判断工艺过程是否处于控制状态、机床是否需要重新调整。

在相同的生产条件下对同种工件进行加工时, 加工误差的出现总遵循一定的规律。因此, 成批大量生产中可以运用数理统计原理, 在加工过程中定时地从连续加工的工件中抽查若干个工件 (一个样组), 并观察加工过程的进行情况, 以便及时检查、调整机床, 以达到预防废品产生的目的。

习题 4

4-1. 解释下列基本概念: 加工误差, 系统误差, 随机误差, 工艺系统, 原理误差, 误差复映系数, 工艺能力系数, 工艺系统刚度。

4-2. 举例说明原理误差, 原理误差是否必须避免或减小?

4-3. 工艺系统刚度的影响因素有哪些? 工艺系统刚度对工件加工精度有何影响? 如何提高工艺系统的刚度?

4-4. 卧式车床的床身导轨在水平面内的直线度误差和在铅垂面内的直线度误差对工件加工精度有何影响? 影响程度有何不同?

4-5. 什么是误差复映? 什么是误差复映规律? 如何减小误差复映?

4-6. 尺寸分布曲线分析方法的特点有哪些?

4-7. 在车床上用两项尖定位加工细长轴时, 出现如图 4-53 所示的形状误差的原因有哪些? 可分别采用哪些措施减小或消除?

4-8. 试分析图 4-54 所示的三种加工情况, 加工后工件表面会产生何种形状误差? 假设工件的刚度很大, 且车床床头刚度大于尾座刚度。

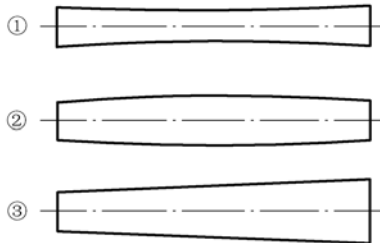


图 4-53 细长轴车削加工

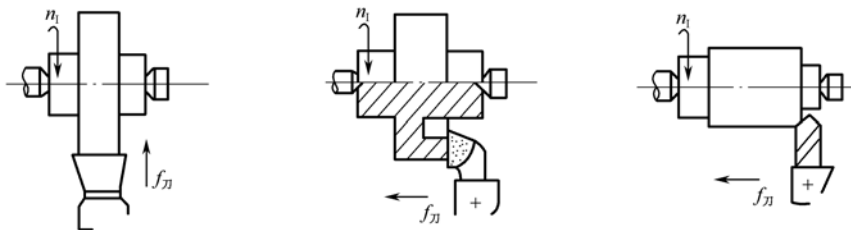


图 4-54 三种车削加工

4-9. 已知某工艺系统的误差复应系数为 0.25，工件在本工序前有圆度误差 0.45mm，若本工序的形状精度规定其圆度误差为 0.01mm，问至少走几次刀才能使形状精度合格？

4-10. 在卧式铣床上铣削键槽，加工如图 4-55 所示。加工完毕测量发现工件键槽两端深度大于中间，且都比调整的深度尺寸值小，试分析产生这种现象的原因并提出改进措施。

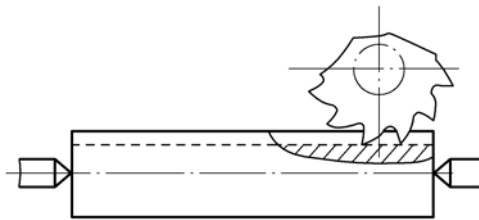


图 4-55 键槽铣削加工

4-11. 在车床上加工丝杠，工件总长 2650mm，螺纹部分长 2000mm，工件和母丝杠的材料都是 45 号钢，加工前室温为 20℃，加工后工件温升至 45℃，丝杠温升至 30℃。试求工件全长上由于热变形引起的螺距累积误差。

4-12. 车削一批设计尺寸为 $\phi 40_{-0.18}^0$ mm 的小轴，若加工后零件尺寸服从正态分布，其标准差 $\sigma=0.025$ ，曲线的顶峰位置偏于公差带中值的左侧 0.05mm，试求工件的合格率和废品率。工艺系统经过怎样的调整可使废品率降低？废品率最低是多少？（近似取 $\pm 3\sigma$ 为尺寸分布的全部范围）。

4-13. 在无心磨床上磨削销轴，销轴外径尺寸要求为 $\phi 12 \pm 0.01$ 。现随机抽取 100 件进行测量，结果发现其外径尺寸接近正态分布，平均值为 $\bar{X}=11.99$ ，均方根偏差为 $\sigma=0.003$ 。

- (1) 画出销轴外径尺寸误差的分布曲线；
- (2) 计算该工序的工艺能力系数；
- (3) 估计该工序的废品率；
- (4) 分析产生废品的原因，并提出解决办法。

第5章

机械加工表面质量

5.1 概述

5.1.1 机械加工表面质量含义

任何机械加工方法所得到的零件表面，实际上都不是完全理想的表面。实践证明，机器零件的破坏，一般都从表层开始，这从一定程度上表明零件的表面质量对产品质量影响很大。产品工作性能的可靠性、耐久性，很大程度上取决于其主要零件的表面质量。机器零件使用性能的耐磨性、疲劳强度、耐蚀性等，除与材料本身的性能和热处理有关外，主要取决于加工后的表面质量。随着产品性能的不断提高，一些重要零件必须在高应力、高速、高温等极端条件下工作，因其工作表面作用有最大应力并直接受外界介质的腐蚀，表面层的任何缺陷都可能引起应力集中、应力腐蚀等现象而导致零件的损坏，于是表面质量问题也会变得突出和复杂。研究表面质量的目的，是要掌握机械加工中各种工艺因素对表面质量的作用及影响规律，以便应用这些规律控制加工过程，最终提高零件的表面质量和产品使用性能。

机械加工表面质量的研究内容包括加工表面几何形状特征和表面层物理、机械性能的变化。其中，表面几何形状特征主要指表面粗糙度（加工表面微观几何形状特性，是加工方法本身所固有的，其产生一般与刀刃形状、刀具进给、切屑的形成过程，如裂屑、剪切、积屑瘤、电镀表面的生成等因素有关）、表面波度（介于表面宏观形状误差与表面粗糙度之间的周期性几何形状特性，与工艺系统的振动有关）和表面纹理（其形成与表面所采用的机械加工

工方法有关)。而表面层物理、机械性能的变化主要指三方面内容,即表面层因塑性变形引起的冷作硬化、表面层因切削热引起的金相组织变化及表面层中产生的残余应力。

5.1.2 机械加工表面质量对机器产品使用性能和使用寿命的影响

零件的机械加工方法,使得被加工表面产生表面微观几何形状误差和表面层物理、力学性能的变化,虽然只发生在很薄的表面层,但这些因素都会影响机器零件的使用性能(即零件的工作精度及其保持性、零件的抗腐蚀性、零件的疲劳强度和零件间的配合性质等),从而进一步影响机器产品的使用性能和使用寿命。

1. 表面质量对零件工作精度及其保持性的影响

机器零件的工作精度与其表面质量有关。机器零件工作精度的保持性主要取决于零件工作表面的耐磨性,耐磨性越高则工作精度的保持性越好。当两个零件的摩擦表面接触时,实际上只有占名义接触面积很小的凸峰部分顶部接触,在外力作用下,凸峰接触部分会产生很大的压强,从而造成表面的弹、塑性变形及剪切滑移等现象,即产生工作表面的磨损;即便有润滑条件存在,也会因接触点处单位面积上的压力过大,超过润滑油膜存在的临界值而破坏油膜,形成干摩擦,进而在工作表面产生磨损。实验证明:摩擦副的初期磨损量与其表面粗糙度关系很大。如图 5-1 所示,在一定条件下有一个初期磨损量最小的表面粗糙度,称为最佳表面粗糙度。图 5-1 中的曲线 I 表示在轻载和良好润滑条件下的实验结果,当载荷加重或润滑条件恶化时,曲线将向右和向上移,如图中曲线 II 所示,此时最佳表面粗糙度也相应右移。初期磨损过程中,摩擦副的表面粗糙度值也相应变化。当原有表面粗糙度高于最佳值时,磨损过程中表面粗糙度会不断下降,直到最后初期磨损结束时趋近于最佳值。当摩擦副原有表面粗糙度低于最佳值时,磨损过程中表面粗糙度会逐渐增高,直到最后也趋近于最佳值。若原有的表面粗糙度等于最佳值,则磨损过程中摩擦副的表面粗糙度基本维持不变,此时初期磨损量最小。

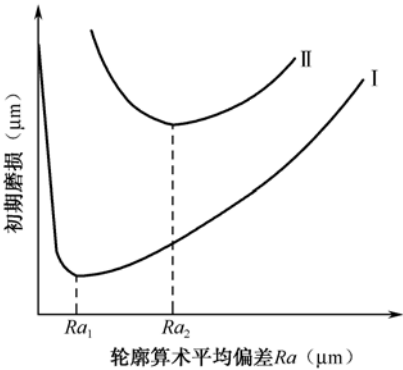


图 5-1 初期磨损量与表面粗糙度的关系

零件加工表面层的冷作硬化现象能在适当的程度上减少摩擦副接触表面的弹性变形和塑性变形,从而提高耐磨性。例如, A4 钢在冷拔加工后硬度能提高 15%~45%,磨损实验中测得的磨损量减少 20%~30%。但并不是冷作硬化程度越高,表面耐磨性就越好。如果加工表面过度硬化(即发生过度冷态塑性变形),将引起表面层金属组织的过度“疏松”,甚至产生微观裂纹和剥落。为此,对任何一种金属材料都有一个表面冷作硬化的最佳值,无论偏离该数值大

还是小，磨损量都会增加。此外，加工表面产生的金相组织变化，会改变表面层的原有硬度，影响表面的耐磨性。

2. 表面质量对零件抗腐蚀性的影响

当机器零件暴露在潮湿的空气或具有腐蚀性的介质中时，常在接触表面产生化学腐蚀或电化学腐蚀。无论是化学腐蚀还是电化学腐蚀，其腐蚀程度均与表面粗糙度密切相关。

腐蚀性介质一般聚集在表面粗糙度凹谷处，特别是在表面裂纹中作用最严重。腐蚀的过程往往是通过凹谷处的微小裂纹向金属层内部渗透进行，直至侵蚀的裂纹扩展相交时，表面的凸峰从表面上脱落而又形成新的凹凸面，此后侵蚀的作用再重新进行。因此，表面粗糙度越高，凹处越尖，就越容易被腐蚀。此外，若表面层存在有残余压应力，会有助于表面微小裂纹的封闭，阻碍侵蚀作用的扩展，从而提高表面的抗腐蚀能力。

3. 表面质量对零件疲劳强度的影响

在交变载荷作用下，零件的表面粗糙度、划痕和裂纹等缺陷会引起应力集中，当微观低凹处的应力超过材料的疲劳极限时，就会产生疲劳裂缝。不同的加工方法得到的表面粗糙度不同，其疲劳强度也有所不同，见表 5-1。从表 5-1 中可以看到，表面粗糙度越高，疲劳强度越低；越是优质钢材，晶粒越细小，组织越致密，则表面粗糙度对疲劳强度的影响越大。此外，加工表面粗糙度的纹理方向对疲劳强度的影响较大，当其方向与受力方向垂直时，疲劳强度将明显下降。

表 5-1 不同加工方法所得表面的相对疲劳强度

加工方法	钢的极限强度 σ_b (MPa)		
	470	950	1420
	相对疲劳强度 (%)		
精细抛光或研磨	100	100	100
抛光或超精研	95	93	90
精磨或精车	93	90	85
粗磨或粗车	90	80	70
轧制钢材使用	70	50	30

加工表面层的冷作硬化能阻碍已有裂纹的扩大和新疲劳裂纹的产生，减轻表面缺陷和表面粗糙度的影响程度，故可提高零件的疲劳强度。加工表面层的残余应力对疲劳强度的影响也很大：若表面层的残余应力表现为压应力，则能部分抵消交变载荷施加的拉应力，阻止疲劳裂纹的再生或扩大，从而在一定程度上提高零件的疲劳强度；若表面层的残余应力表现为拉应力，则在交变载荷作用下零件容易产生裂纹，从而大大降低零件的疲劳强度。

4. 表面质量对零件间配合性质的影响

机器中相配合的零件，无论是间隙配合还是过盈配合，若加工表面粗糙度过大，就会影响零件间实际相互配合的配合性质。一台新机器的正常持久的工作状态起始于它的初期磨损，即机器先要经过一个所谓“跑合”阶段才能进入正常的工作状态。若具有间隙配合的配合表面粗

糙度过高,则经初期磨损后其配合间隙就会增大很多,从而改变原有的配合性质,造成新机器的漏气、漏油或晃动而不能正常工作。为此,在配合间隙要求很小的情况下,就不仅要保证配合表面具有较高的尺寸和形状精度,还应保证具有足够低的表面粗糙度。

对于过盈配合的组件,其配合表面的粗糙度对配合性质的影响也很大。按测量得到的配合件尺寸经计算的过盈量与组装后的实际过盈量相比,由于表面粗糙度的影响,常常不一致。因为过盈量是相配合组件的轴和孔的半径差,而轴和孔的直径在测量时都将受到表面粗糙度的影响而产生测量误差。对孔来说,应在测得的直径尺寸上加上一个 R_z (微观不平度十点高度) 才是真正影响过盈配合松紧程度的有效尺寸;而对轴而言,则应减去一个 R_z 才是真正有效尺寸。为满足原有的过盈配合要求,计算时可将表面粗糙度的影响考虑作为补偿。

5.1.3 机械加工表面质量的研究内容

为保证机器产品的使用性能和使用寿命,机械加工表面质量的研究应包括如下内容:

- (1) 表面粗糙度及其降低的工艺措施;
- (2) 表面层物理、力学性能及其改善的工艺措施;
- (3) 机械加工中的振动及其控制。

5.2 表面粗糙度影响的工艺因素及其改善的工艺措施

5.2.1 切削加工表面粗糙度

用力去除的工艺方式对零件表面进行加工时,可能会造成加工表面粗糙度的因素包括几何因素、物理因素和工艺系统的振动三方面。

1. 几何因素

对于车削加工,若主要是以刀刃的直线部分形成表面粗糙度(不考虑刀尖圆弧半径的影响),则如图 5-2 (a) 所示,可通过确定的几何关系导出:

$$H = f / (\cot k_r + \cot k'_r)$$

式中, f 为刀具的进给量,单位为 mm/r; k_r 、 k'_r 为刀具的主偏角和副偏角。

若加工时的切削深度和进给量均较小,则加工后表面粗糙度主要由刀尖的圆弧部分构成,其中的关系可由图 5-2 (b) 所示的几何关系导出:

$$H = r_\epsilon [1 - \cos(\alpha/2)] = 2r_\epsilon \sin^2(\alpha/2)$$

当中心角很小时,可用 $[\sin(\alpha/2)]/2$ 代替 $\sin(\alpha/4)$, 且 $\sin(\alpha/2) = f/(2r_\epsilon)$, 故得:

$$H \approx 2r_\epsilon [f/(4r_\epsilon)]^2 = f^2/(8r_\epsilon)$$

残留面积高度 H 反映了 R_z 的大小。但两者在数量上还存在一些差别,因为 R_z 不仅受刀具几何形状的影响,同时还受表面金属层塑性变形的影响。在进给量小、切屑薄及金属层材料塑性较大的情况下,这个差别就表现得更明显。

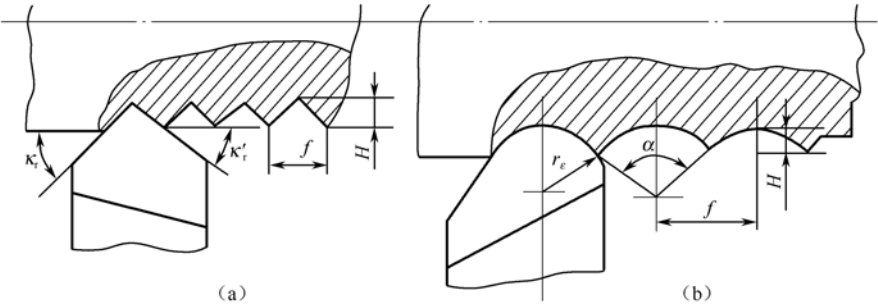


图 5-2 车削加工时影响表面粗糙度的几何因素

对铣削、钻削等加工，也可按几何关系导出类似的关系式，找出影响其表面粗糙度的几何因素。但对铰孔加工来说，如同用宽刃车刀精车加工一样，刀具的进给量对加工表面粗糙度的影响不大。为减少和消除几何因素对加工表面粗糙度的影响，可通过选用合理的刀具几何角度、减小进给量和选用具有直线过渡刃的刀具来改善。

2. 物理因素

切削加工后表面的实际轮廓与纯几何因素所形成的理想轮廓往往差别较大。这主要是因为加工过程中还有塑性变形等物理因素的影响。这些物理因素的影响一般较复杂，它与切削原理中所叙述的加工表面的形成过程有关，如在加工过程中产生的积屑瘤、鳞刺和振动等对加工表面粗糙度的形成均有很大影响。

1) 切削用量对加工表面粗糙度的影响

(1) 进给量 f 的影响。在粗加工和半精加工中，当 $f > 0.15\text{mm/r}$ 时，对表面粗糙度 R_z 的影响很大，符合前面分析的几何因素的影响关系。当 $f < 0.15\text{mm/r}$ 时，则 f 的进一步减少就不能引起 R_z 明显的降低。 $f < 0.02\text{mm/r}$ 时，就不能使 R_z 再降低，这时加工表面粗糙度主要取决于被加工表面的金属塑性变形程度。

(2) 切削速度 v 的影响。加工塑性材料时，切削速度对表面粗糙度的影响较大。切削速度越高，切削过程中切屑和加工表面层的塑性变形程度越轻，加工后表面粗糙度也就越低，如图 5-3 中的 R_z 曲线。当切削速度较低时，刀刃上易出现积屑瘤，它将破坏加工表面粗糙度。经实验证明，当切削速度 v 下降到某一临界值以下时， R_z 将明显提高，见图 5-3 中的 R_z 曲线。产生积屑瘤的临界速度将随加工材料、冷却润滑及刀具状况等条件的不同而不同。加工脆性材料时，切削速度对表面粗糙度的影响不大。一般来说，切削脆性材料比切削塑性材料容易达到表面粗糙度的要求。

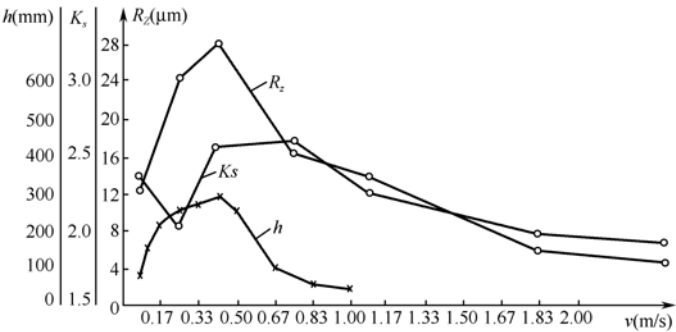


图 5-3 45 钢材料切屑收缩系数 K_s 、积屑瘤高度 h 和表面粗糙度 R_z 与切削速度 v 的关系

(3) 切削深度 a_p 的影响。一般来说切削深度 a_p 对加工表面粗糙度的影响是不明显的。但当 a_p 小到一定数值以下时, 由于刀刃不可能刃磨得绝对尖锐, 而是具有一定的刃口半径 r_e , 这时正常切削不能维持, 常出现挤压、打滑和周期性地咬入加工表面等现象, 从而使表面粗糙度提高。为降低加工表面粗糙度, 应根据刀具刃口刃磨的锋利情况选取相应的切削深度 a_p 值。

2) 工件材料性能对加工表面粗糙度的影响

工件材料的韧性和塑性变形倾向越大, 切削加工后的表面粗糙度越高。例如低碳钢工件, 加工后的表面粗糙度高于中碳钢工件。因为黑色金属材料中铁素体的韧性好, 塑性变形大, 若能将铁素体-珠光体组织转变为索氏体或屈氏体-马氏体组织, 就可以降低加工后的表面粗糙度。

工件材料金相组织的晶粒越均匀、颗粒越细, 加工时越能获得较低的表面粗糙度。为此, 对工件进行正火或回火处理后再加工, 能使加工表面粗糙度明显降低。

3) 刀具材料对加工表面粗糙度的影响

不同的刀具材料因化学成分的不同, 加工中其前后刀面的硬度及粗糙度的保持性、刀具材料与加工材料金属分子的亲合程度, 以及刀具前后刀面与切屑和加工表面间的摩擦系数等均有所不同。实验证明, 在相同的切削条件下, 用硬质合金刀具加工所获得的表面粗糙度要比用高速钢刀具加工所获得的数值低。采用金刚石刀具加工比采用硬质合金刀具加工所获得的表面粗糙度还要低很多。金刚石刀具主要用于有色金属及其合金零件表面的镜面加工。金刚石刀具的加工之所以能获得粗糙度极低的加工表面, 其原因在于以下几点:

(1) 金刚石刀具的硬度和强度高, 并能高温下保持其良好的切削特性, 因此在长时间的切削加工过程中, 其刀尖圆弧半径和刃口半径均能保持不变, 刀具刃口锋利。

(2) 金刚石系共晶结合, 与其他金属材料的亲和力很小, 加工时切屑不会焊接或黏结在刀尖上 (即不产生积屑瘤), 这对降低加工表面的粗糙度十分有利。

(3) 金刚石刀具前、后刀面的摩擦系数很小, 加工时的切削力及表面金属的塑性变形程度也都比其他刀具材料小, 故也可降低加工表面粗糙度。

此外, 合理选择刀具角度, 适当增大刀具的前角和刃倾角; 提高刀具刃磨质量, 降低刀具前、后刀面本身的表面粗糙度以及合理地选择冷却润滑液等, 均能有效地降低加工表面的表面粗糙度。

4) 其他因素的影响

在加工塑性材料 (如低碳钢、铬钢、不锈钢、高温合金、铝合金等) 时, 常容易出现积屑瘤和鳞刺, 使加工表面粗糙度严重恶化。积屑瘤是切削过程中切屑底层与前刀面发生冷焊作用的结果, 积屑瘤很不稳定, 容易破裂, 一部分黏附于切屑底部而排出, 另一部分则残留在加工表面上, 如图 5-4 所示。由于刀具前刀面上突出的积屑瘤造成刀刃部分尺寸的变化, 会引起切削层厚度的变化, 同时积屑瘤的轮廓很不规则, 所以使加工表面上出现深浅和宽窄都不断变化的刀痕, 使加工表面的粗糙度值增大。

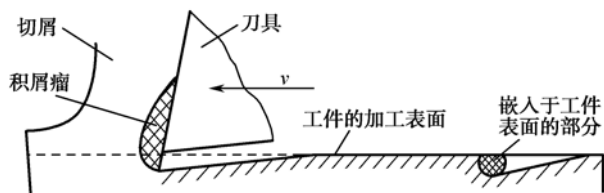


图 5-4 积屑瘤对工件表面质量的影响

鳞刺是已加工表面上出现的鳞片状毛刺般的缺陷。加工过程中出现鳞刺是由于切屑在前刀面上的摩擦和冷焊作用造成周期性的停留,代替刀具推挤切削层,从而造成切削层和工件之间出现的撕裂现象。如图 5-5 所示为鳞刺的形成过程,经过抹拭阶段、导裂阶段、层积阶段和刮成阶段,就在加工表面上出现一系列的鳞刺,从而使得被加工表面的粗糙度值增大。

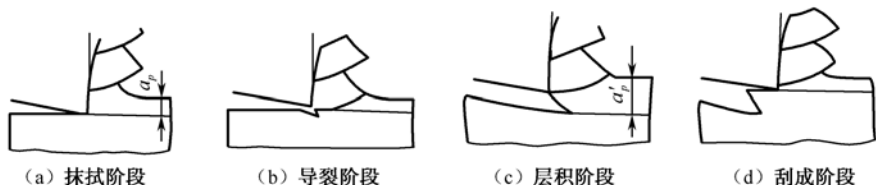


图 5-5 鳞刺形成过程

从物理因素看,要减小表面粗糙度值,应采取措施减小加工时的塑性变形,避免产生积屑瘤和鳞刺。对此影响最大的是切削速度、被加工材料的性质及刀具的几何形状、刀具材料和刃磨质量等。合理选择冷却润滑液,可以减少材料的塑性变形和摩擦,降低切削区温度,抑制积屑瘤和鳞刺的形成,有利于减小加工表面的粗糙度值。

3. 工艺系统振动

工艺系统的低频振动,一般在工件的已加工表面上产生表面波度,而工艺系统的高频振动将对已加工表面的粗糙度产生影响。为降低加工表面的粗糙度,则必须采取相应措施防止加工过程中产生高频振动。

在上述影响加工表面粗糙度的几何因素和物理因素中,究竟是以哪个为主,这要根据不同情况而定。一般来说,对脆性金属材料的加工是以几何因素为主;而对塑性金属材料的加工,特别是韧性大的材料则是以物理因素为主。此外,还要考虑具体的加工方法和加工条件,如对切削截面很小和切削速度很高的高速细镗加工,其加工的表面粗糙度主要是由几何因素引起的;对切削截面宽而薄的铰孔加工,由于刀刃很直很长,切削加工时从几何因素分析不应产生任何表面粗糙度,所以主要是物理因素引起的。

5.2.2 磨削加工表面粗糙度

磨削中工件表面粗糙度的形成,也与加工过程中的几何因素、物理因素和工艺系统振动等有关。从纯几何角度考虑,砂轮磨料粒度号越大,砂轮速度 $v_{\text{砂}}$ 越高,工件速度 $v_{\text{工}}$ 越低,砂轮相对工件的进给量 f 越小,则加工后的表面粗糙度越低。

从塑性变形角度来看,磨削过程中由于磨粒大多具有很大的负前角,所以产生很大的塑性变形。另外,磨削加工时温度很高,大多数磨粒在工件表面只有划擦、耕犁作用,使得金属沿着磨粒的两侧流动,形成沟槽两侧的隆起,从而使工件表面粗糙度值增大。

影响磨削表面粗糙度的因素主要有以下几个方面。

1. 砂轮的粒度

砂轮粒度越细,单位面积上的磨粒数越多,在工件表面上磨削的刻痕就越密而细,加工后得到的工件表面粗糙度值就越小。但若砂轮粒度过细,砂轮容易堵塞,使磨粒失去切削能力,

增加摩擦热,反而造成工件表面塑性变形增大,从而增大工件的表面粗糙度值。如图 5-6 所示,粒度号越大,加工表面粗糙度越低。但若粒度号过大,则只能采用很小的磨削深度($a_p=0.0025\text{ mm}$ 以下),还需要时间很长的空行程,否则砂轮容易被堵塞,造成工件烧伤。为此,一般磨削采用的砂轮粒度号都不超过 80 号,常用的是 46~60 号。

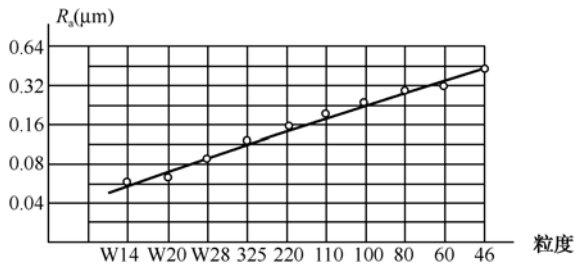


图 5-6 砂轮粒度对加工表面粗糙度的影响

2. 砂轮的硬度

砂轮太软,磨粒容易脱落,磨料不能充分发挥切削作用,工件表面粗糙度值增大;砂轮太硬,磨钝的磨粒不易脱落,加剧了摩擦和挤压,塑性变形加大,也增大了表面粗糙度值。

3. 砂轮的修整

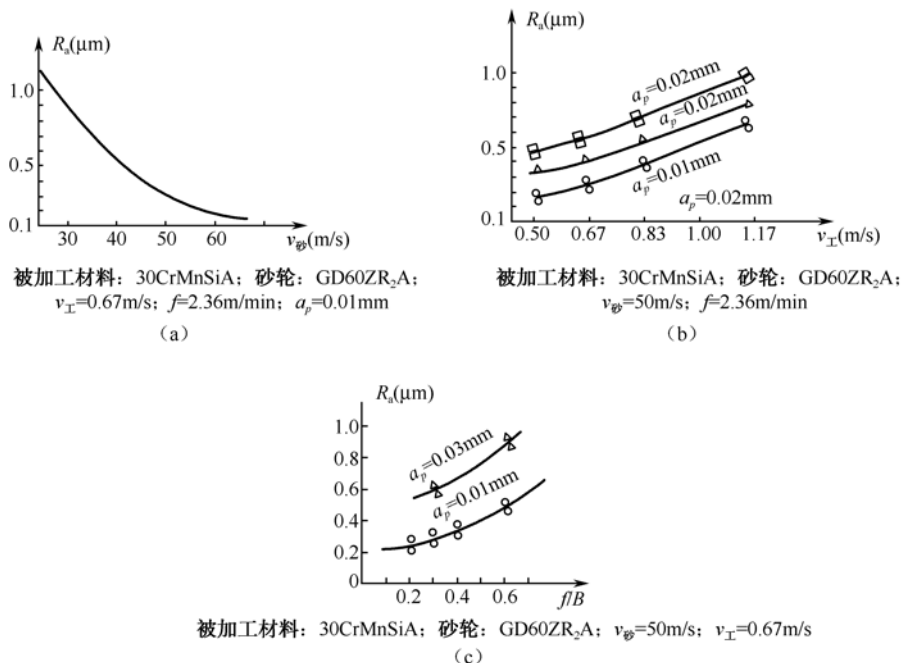
砂轮的修整质量越高,磨粒微刃就越细越多,磨削刃的等高性也越好,加工出的工件表面粗糙度值也就越小。

若砂轮工作表面修整得不好,其上砂粒不处在同一高度,就相当于其中部分较低的砂粒将不起磨削作用,加工时单位面积上通过的砂粒数就会减少,加工后的表面粗糙度必然增高。在磨削加工的最后几次行程之前,对砂轮进行一次精细修整,使每个砂粒产生很多个等高的微刃,这就相当于选用粒度号大的砂轮进行磨削,从而达到 $R_a=0.04\mu\text{m}$ 以下的表面粗糙度。这种低粗糙度磨削所使用的磨料是常用的 46~60 号粒度,对砂轮工作表面的精细修整的要求是使用金刚石修整器,修整切深为 0.005mm 以下,修整时的砂轮纵向进给量为每转 0.02mm 以下,修整完毕后应对砂轮边角进行倒角并用冷却润滑液冲洗砂轮工作表面。当机床工作状况正常、磨削用量合适时,加工表面粗糙度可达 $R_a=0.016\sim0.032\mu\text{m}$ 。

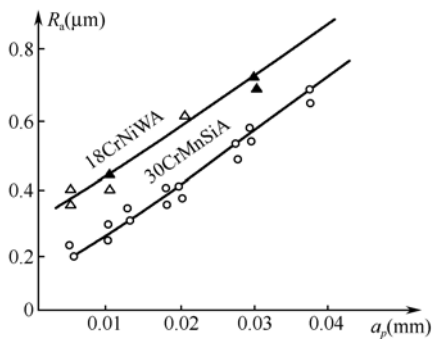
4. 磨削用量

合理选择磨削用量,可以提高工件单位面积上的磨削磨粒数量,增加刻痕数,减小塑性变形程度,从而减小表面粗糙度值。增加砂轮速度、减小工件圆周进给速度和轴向进给量,则单位切削面积上通过的磨粒数就越多,砂轮上每个磨粒的平均磨削厚度小,塑性变形小,工件的表面粗糙度值减小;磨削深度越小,工件塑性变形程度越小,表面粗糙度值也越小。因此,通常在磨削过程中,开始采用较大磨削深度,以提高生产率;而后采用小磨削深度或无进给磨削(光磨),以减小粗糙度值,光磨次数越多,则实际磨削深度越来越小,可以获得极小的表面粗糙度值。

砂轮速度 $v_{\text{砂}}$ 、工件速度 $v_{\text{工}}$ 及砂轮相对工件的进给量 f 对加工表面粗糙度的影响,可由图 5-7 中的实验曲线证实。

图 5-7 v_θ 、 v_x 、 f 与表面粗糙度 R_a 的关系

由对切削过程的分析可知,磨削速度远比一般切削加工时的切削速度高,但不能就此认为磨削加工中的塑性变形不严重。磨削加工过程,由于砂粒的切削刃并不锋利,其圆弧半径可达十几微米,而每个砂粒所切下的切屑厚度一般仅为 $0.2\mu\text{m}$ 左右。因此大多数砂粒在磨削过程中只在加工面上挤过,根本没有切削,磨除量是在很多后继砂粒的多次挤压下,经过充分的塑性变形出现疲劳后剥落的。所以,加工表面的塑性变形不是很轻,而是很严重。磨削深度 a_p 的增大将增加塑性变形程度,从而影响加工表面的粗糙度。图 5-8 所示的实验曲线也说明了这一点。

被加工材料: 18CrNiWA 及 30CrMnSiA; 砂轮: GD60ZR₂A; $v_\theta=50\text{m/s}$; $v_x=0.67\text{m/s}$; $f=2.2\text{m/min}$ 图 5-8 磨削深度 a_p 对磨削表面粗糙度 R_a 的影响

由于磨削深度 a_p 对加工表面粗糙度有较大影响,在精密磨削加工的最后几次行程总是采用极小的磨削深度。实际上这种极小的磨削深度不是靠磨头进给获得的,而是靠工艺系统在前几次进给行程中磨削力作用下的弹性变形逐渐恢复得以实现的。在这种情况下行程常称为空行程或无进给磨削。精密磨削的最后阶段,一般均应进行这样的几次空行程,以便得到较低的

表面粗糙度。

根据图 5-7、图 5-8 所示实验结果, 可得到如下经验公式:

$$Ra = C(v_{\text{工}}^{0.8} f^{0.66} a_p^{0.48} / v_{\text{砂}}^{2.7})$$

5. 工件材料

一般来说, 太硬、太软、韧性大的材料都不易磨光。太硬的材料使磨粒易钝, 磨削时的塑性变形和摩擦加剧, 从而使表面粗糙度增大, 且表面易烧伤甚至产生裂纹而使零件报废。铝、铜合金等较软的材料, 由于塑性大, 在磨削时磨屑易堵塞砂轮, 使表面粗糙度增大。韧性大、导热性差的耐热合金易使砂粒崩落, 使砂轮表面不平, 导致磨削表面粗糙度值增大。

6. 切削液

切削液的加入可及时冲走碎落的磨粒, 降低磨削区的温度, 减小塑性变形, 降低表面粗糙度值, 并能防止磨削烧伤。另外, 冷却润滑液的成分和洁净程度对加工表面粗糙度的影响也很大。

在磨削加工过程中, 工艺系统的抗振性能对加工表面粗糙度的影响也不容忽视。

5.2.3 超精研、研磨、珩磨和抛光加工的表面粗糙度

超精研、研磨、珩磨和抛光加工, 一般只规定加工时的压强。加工时所用的工具由加工面本身导向而相对于工件的定位基准没有确定的位置, 所使用的机床也不需要具有非常精确的成型运动。所以这些加工方法的主要作用是降低表面粗糙度, 而加工精度则主要由前面工序保证。采用这些方法加工时, 其加工余量都不可能太大, 一般只是前道工序公差的五分之一。因此, 这些加工方法均被称为零件表面的光整加工技术。

1. 超精研

超精研是降低零件加工表面粗糙度的一种工艺方法, 其工作原理及切削过程简介如下。

1) 超精研的工作原理

超精研是采用细粒度的磨条在一定的压力和切削速度下做往复运动, 对工件表面进行光整加工的方法。其加工原理如图 5-9 (a) 所示, 加工中有三种运动: 工件低速回转运动 1、磨条轴向进给运动 2 和磨条高速往复振摆运动 3。这三种运动使磨粒在工件表面上形成不重复的复杂轨迹。若不考虑磨条的轴向进给运动, 则磨粒在工件表面走过的轨迹是如图 5-9 (b) 所示的余弦曲线。磨条的往复振摆由电动机传动偏心轮产生。如图 5-9 (b) 中, O 为偏心轮的转动中心, O_1 为偏心销中心。磨条的振幅 A 为偏心距 e 的两倍。磨条振摆速度 $v \cos \varphi$ 与工件的回转速度 $v_{\text{工}}$ 构成的切削角 β 是超精研加工的重要参数之一。

2) 超精研的切削过程

超精研的切削过程与磨削不同, 一般可划分为如下四个阶段。

(1) 强烈切削阶段: 研磨初始阶段的工件表面粗糙, 少数凸峰上的压强很大, 破坏了油膜, 故切削作用强烈。

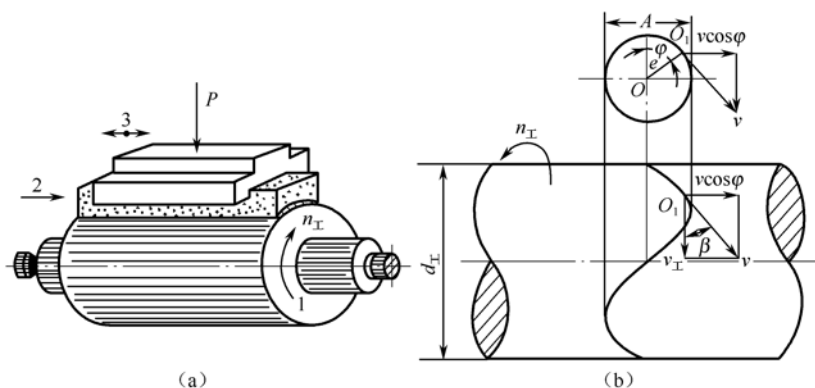


图 5-9 超精研加工原理及其运动轨迹

(2) 正常切削阶段：当少数凸峰被研磨平之后，接触面积增加，单位面积上的压力下降，致使切削作用减弱而进入正常切削阶段。

(3) 微弱切削阶段：随接触面积逐渐增大，单位面积上压力更低，切削作用微弱，且细小的切屑易形成氧化物而嵌入磨条的空隙中，从而使磨条产生光滑表面，对工件表面进行抛光。

(4) 停止切削阶段：工件表面被研平，单位面积上的压力极低，磨条与工件之间又形成油膜，不再接触，故切削自动停止。

2. 研磨

研磨是一种最常用的光整加工和精密加工方法。在采用精密的定型研磨工具的情况下，可以达到很高的尺寸精度和形状精度，表面粗糙度可达 $R_z=0.04\sim 0.4$ ，多用于精密对偶件的加工及精密量规和精密量块等器件的最终加工。研磨加工的基本原理如图 5-10 所示。它是通过介于工件与硬质研具间磨料或研磨液的流动，在工件和研磨剂之间产生机械摩擦或机械化学作用来去除微小加工余量的。

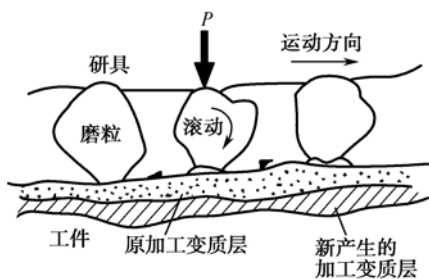


图 5-10 研磨加工原理图

1) 研磨加工特点

(1) 制作研具的材料硬度要比工件材料的硬度低。制作研具的材料为铸铁、铜、青铜、巴氏合金、塑料及硬木等，有时也可用钢做研具。

(2) 研磨加工不仅具有磨粒切削金属的机械加工作用，同时还渗透了化学作用。磨料混合液或研磨膏使工件表面形成氧化层，使之易于被磨料所切除，因而大大加速了研磨过程的顺利进行。

(3) 研磨时研具和工件的相对运动较复杂，因此每一磨粒都不会在工件表面上重复自己的运动轨迹，这样就有可能均匀地切除工件表面上的凸峰。

(4) 研磨可以获得很高的尺寸精度和很低的表面粗糙度,也可以提高工件表面的宏观形状精度,但不能提高工件表面间的位置精度。

2) 研具

研磨工具的材料应软硬适当,一般选用比工件材料软且组织均匀的材料。制造研具的材料最常用的是铸铁材料。因为铸铁研具适用于加工各种材料的工件,能保证较好的研磨质量和较高的生产率,且研具制造容易,成本也较低。铜、铝等软金属研具较铸铁研具容易嵌入较大的磨料,因此它们适用于切除较大余量的粗研加工;相反,铸铁研具则适用于精研加工。

3) 研磨剂

研磨剂是由磨料和油脂混合起来的一种混合剂。研磨加工中所使用的磨料主要有:金刚石粉(C)和碳化硼(B_4C),主要用于硬质合金的研磨加工;氧化铬(Cr_2O_3)和氧化铁(Fe_2O_3)是极细的磨料,主要用于表面粗糙度要求低的表面研磨加工;碳化硅(SiC)和氧化铝(Al_2O_3)是一般常用的两种磨料。研磨加工中,研磨液(油脂)对加工表面粗糙度和生产率的影响也是不可忽视的。加工中研磨液不仅起到调和磨料和润滑冷却的作用,而且在研磨过程中还要起化学作用,以加速加快研磨过程。目前常用做研磨液的油脂主要有:变压器油、凡士林油、锭子油、油酸和葵花子油等。

4) 研磨参数

(1) 磨料粒度。粒度越细则加工后的表面粗糙度越低。粗研时为了提高生产率,用较粗的粒度,如W28~W40;精研时则用较细的粒度,如W5~W28;镜面研磨时则用更细的粒度,如W1~W3.5,甚至还有用W0.5的。

(2) 研磨速度。研磨时的切削速度较低,一般都小于0.5m/s,精密研磨时则应小于0.16m/s。

(3) 研磨余量。为提高生产效率和保证研磨质量,研磨余量应尽量小,手工时不大于10 μm ,机械研磨时小于15 μm 。

(4) 研磨压强。研磨时所采用的压强,在手工研磨时主要靠操作者的感觉来确定;采用机械研磨时,可用0.01~0.03MPa,若划分粗、精研阶段,则粗研阶段用0.1~0.3MPa,精研阶段用0.01~0.1MPa。

3. 珩磨

珩磨加工也是常用的光整加工工艺方法,它不仅可以降低加工表面粗糙度,而且在一定的条件下还可以提高工件的尺寸及形状精度。珩磨加工过程基本上与超精研加工过程相同。开始时珩磨头或珩磨轮与工件接触面积小,单位面积压力大,而且珩磨头或珩磨轮上的磨粒有自励性,故切削作用强烈。随着工件加工表面粗糙度的凸峰被逐渐磨平,压强下降,磨粒的切削作用也就逐渐趋于停止。珩磨加工主要用于内孔表面,但也可以对外圆或齿形表面进行加工。珩磨加工后的表面粗糙度一般为 $R_z=0.4\sim 3.2$,在一定条件下还可达到 $R_z=0.1$ 以下。

4. 抛光

通常所说的抛光与研磨并无本质上的区别,只是其工具由软质材料(如无纺布或毛毡等)制成。当被加工表面只要求低的表面粗糙度,而对形状精度没有严格要求时,就不能用硬的研具而只能用软的研具进行抛光加工。抛光常用于去掉前面工序所留下来的痕迹,或者用于“打光”已经精加工过的表面。为了得到光亮美观的表面和提高疲劳强度,或为镀铬等做准备,也常采用抛光加工,如钻头上螺旋沟的抛光加工及各种手轮、手柄等镀铬前的抛光加工。机械抛

光所用的研具常用帆布、毛毡等做成，它们可对平面、外圆、沟槽等进行抛光。抛光磨料可用氧化铬、氧化铁等，也可用按一定化学成分配合制作的抛光膏。

抛光过程中虽不易保证均匀地切下金属层，但在单位时间内切下的金属却是较多的，每分钟可切下十分之几毫米厚的金属层。

液体抛光是将含磨料的磨削液经喷嘴用 6~8 个大气压高速喷向已加工表面，磨料颗粒就能将原来已加工过工件表面的凸峰击平，从而得到极光滑的表面。液体抛光之所以能降低加工表面粗糙度，主要是由于磨料颗粒对表面微观凸峰高频（200~2500 万次/秒）和高压冲击的结果。液体抛光的生产率极高，表面粗糙度可达 $R_z=0.8\sim0.1$ ，并且不受工件形状的限制，故可对某些其他光整加工方法无法加工的部位，如对内燃机进油管内壁等进行抛光加工。

高效、先进的抛光工艺方法除液体抛光外，还有电解抛光、化学抛光等工艺方法。

影响表层力学物理性能的工艺因素及其改进的工艺措施

5.3

5.3.1 加工表面层的冷作硬化

1. 工件表面层的冷作硬化现象

表层金属塑性变形将伴随产生下列现象：

- (1) 晶格的扭曲、畸变，使金属原子处于高能位的不稳定状态，在表层金属中产生内应力；
- (2) 大小、方向不一的许多晶粒之间发生不均匀的形变，致使晶粒间产生内应力；
- (3) 晶粒滑移减小了晶体结构的不均匀性，提高了多晶体金属的强度；
- (4) 晶粒细化加大了滑移面的制动作用；
- (5) 在多晶体的变形方向，晶粒被拉长，形成纤维组织，增大了晶粒周界的面积，加大了晶粒表面张力的作用，从而提高了多晶体的强度，降低了金属的塑性；
- (6) 在滑移面上产生碎块组织，加大了继续沿该面滑移的阻力；
- (7) 塑性变形过程，改变了晶粒的形状，促成机械咬接，使晶粒间变形困难。

在金属切削塑性变形过程中发生的上述现象，统称为冷作硬化，简称冷硬（或称为强化）。表层金属冷硬的结果，会增大金属变形的阻力，减小金属的塑性，金属的物理性质（如比重、导电性、导热性等）也有所变化。金属冷硬的结果使金属处于高能位的不稳定状态，只要条件允许，金属的冷硬结构本能地会向比较稳定的结构转化，这种转化通常称为弱化。弱化促使结构恢复，消除或减弱表层金属冷硬的效果。弱化程度取决于下列条件：

- (1) 温度。当温度 $T > (0.25\sim0.3) T_{\text{熔}}$ 时，歪扭的晶格将局部地开始恢复；当温度 $T > 0.4T_{\text{熔}}$ 时，将发生金属的再结晶，由于冷硬而改变的物理机械性质几乎可以完全恢复。
- (2) 时间。
- (3) 冷硬程度。冷硬程度越大，就越不稳定，恢复的趋向就越强烈。
- (4) 外界所给予的能量。

弱化不能脱离强化单独存在，强化造成了弱化的条件。机械加工后表面层金属的最后性质取决于强化和弱化两个过程的综合作用。

2. 冷作硬化的评定

如图 5-11 所示，评定冷作硬化的指标主要有以下几项：

- (1) 表层金属的显微硬度 H ;
- (2) 硬化层深度 h ;
- (3) 硬化程度 N 。

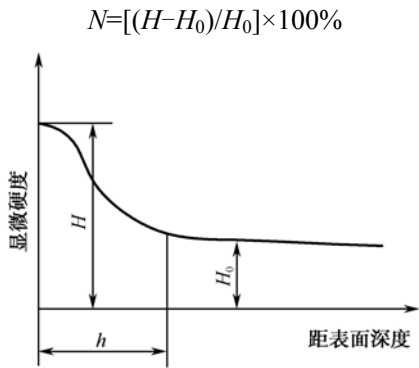


图 5-11 切削加工后表面层的冷作硬化

3. 影响冷作硬化的因素评定

1) 影响切削加工表面冷作硬化的因素

(1) 切削用量的影响。

① 进给量的影响。车削 45 号钢时，进给量对表层金属冷硬的影响如图 5-12 所示。由图示可知，加大进给量时，表层金属的显微硬度也随之增加，这是因为随着进给量的增大，切削力也增大，表层金属的塑性变形加剧，冷硬程度增大。但是这种情况只在进给量较大时成立。在切薄的切屑时，如果把切屑厚度减少到低于一定的数值，如小于 0.05~0.06mm 时，则表面层金属的冷硬程度不仅不会减小，相反会大大增大，如图 5-13 所示。由切削原理可知，切削厚度减小，切削比压要增大，表面层金属的冷硬当然就要加大。

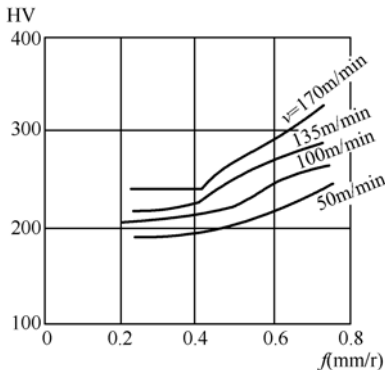


图 5-12 进给量对冷硬的正影响关系

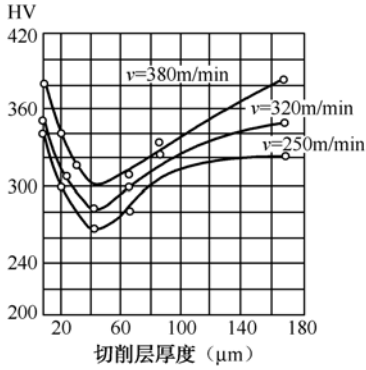


图 5-13 进给量对冷硬的负影响关系

② 切削速度的影响。当切削速度增大时, 刀具与工件的作用时间减少, 因此塑性变形的扩展深度减小; 此外, 切削热在工件表面层上作用的时间也缩短了, 使冷硬程度增加。由图 5-12 及图 5-13 所示可知, 在所有情况下, 显微硬度曲线的位置都是随着切削速度的增大而增高的。但还需指出, 在车削高塑性钢时, 在不同速度范围内, 切削速度对表面冷硬的影响是不同的。在形成积屑瘤的切削速度区域内, 增大切削速度, 表面层的塑性变形程度是先增大, 后减小, 表层金属的冷硬程度也将随之做相应的变化。但在切削速度超过积屑瘤形成区域以外时, 加大切削速度, 冷硬的程度和深度都将减小。例如, 以速度 14m/min 车削 A3 钢时, 冷硬层深度达到 $100\mu\text{m}$; 而在速度为 208m/min 时, 只有 $38\mu\text{m}$; 冷硬程度也显著降低。

③ 切削深度的影响。许多研究都指出, 改变切削深度对表面层冷硬没有显著的影响。有实验表明, 把铣削深度从 1mm 增大至 5mm , 冷硬深度只从 $70\mu\text{m}$ 增加到 $84\mu\text{m}$ 。这就是说, 铣削深度增大至 5 倍, 冷硬深度只增加了 20%。可见, 切削深度对表面冷硬的影响是很小的。

(2) 刀具几何形状的影响。

① 切刃圆角半径的影响。实验证明, 已加工表面的显微硬度 HV 随切刃圆角半径的加大而明显增加。原因是随着切刃圆角半径增大, 径向切削分力也增大, 表层金属的塑性变形程度加剧, 导致冷硬增加。

② 前角的影响。前角在 $\pm 20^\circ$ 范围内变化时, 对表面层的冷硬没有显著的影响。前角小于 -20° 时, 表面层的冷硬将急剧增大, 如图 5-14 所示。当前角从 $\gamma=0^\circ$ 改变到 $\gamma=-60^\circ$, 表层金属的显微硬度 HV 从 450 增大到 730, 增加了 62%; 冷硬深度则从 $50\mu\text{m}$ 增大到 $200\mu\text{m}$, 增大了 3 倍多。

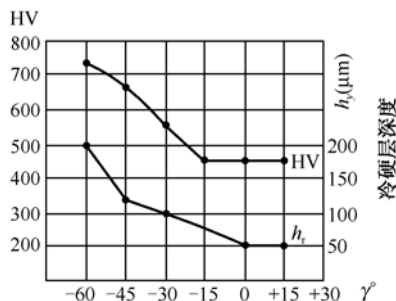


图 5-14 前角对表层冷硬的影响

③ 刀具磨损的影响。刀具磨损对表层金属的冷硬有明显的影响。有研究表明: 刀具后刀面磨损宽度 VB 从 0 增大至 0.2mm , 表层金属的显微硬度 HV 由 220 增大到 340。这是由于磨损宽度加大之后, 刀具后刀面与被加工工件的摩擦加剧, 塑性变形增大, 导致表面冷硬加大。但磨损宽度 VB 继续加大, 摩擦热急剧增大, 弱化趋势明显增加, 表层金属的显微硬度 HV 逐渐下降, 直至稳定在某一水平上。后角 α 、偏角 k_r 、 k'_r 以及刀尖圆角半径 r_e 等对表层冷硬影响不大。它们对加工表面的冷硬只有间接的影响, 这些参数发生变化时, 会改变车刀后刀面上的磨损面积的形状和宽度。此外, k_r 和 r_e 改变时, 切削层的厚度改变, 引起加工表面显微硬度的变化。

(3) 加工材料性能的影响。在相同的加工条件下, 加工不同材料的工件, 表面层冷硬程度和冷硬深度都不相同。工件材料的塑性越大, 强化倾向越大, 强化越严重。碳钢中含碳量越高, 强度越高, 强化就越小。例如, 用 YT15 车刀, $a_p=0.5\text{mm}$, $f=0.21\text{mm/r}$, $v=390\text{m/min}$, 切削 10

号钢，前刀面接触区温度 $\theta=890^{\circ}\text{C}$ ，硬化深度 $h_y=55\mu\text{m}$ ，硬化程度 $N=140\%$ ；车削 T12A 工具钢， $v=127\text{m/min}$ ， $\theta=1000^{\circ}\text{C}$ ， $h_y=32\mu\text{m}$ ， $N=115\%$ 。高锰钢 Mn12 的强化指数很大，切削后已加工表面的硬度可提高 2 倍以上。有色金属金属的熔点较低，容易弱化，加工硬化就比结构钢轻得多，铜件比钢件小 30%，铝件比钢件小 75%左右。

2) 影响磨削加工表面冷作硬化的因素

(1) 工件材料。磨削高碳工具钢 T8，加工表面冷硬程度平均可达 160%~165%，个别可达 200%；而磨削塑性很好的纯铁时，表层冷硬程度平均可达 175%~180%，有时可达 240%~250%。为什么磨纯铁比磨高碳工具钢的冷硬倾向大呢？有两个原因：一是因为纯铁的塑性好，磨削时塑性变形大，强化倾向大；二是因为纯铁的导热性比高碳钢高，热不容易集中在表面层，弱化的倾向小。

分析工件材料对磨削表面冷硬的影响，可从材料的塑性和材料的导热性两个方面分析。一般来说，工件材料的塑性越好，导热性越好，则其冷硬的倾向就越大。

(2) 磨削用量。

① 磨削深度 a_p 的影响。在其他条件不变的情况下，加大磨削深度，磨削力随之增大，磨削过程的塑性变形加剧，表面冷硬趋向增大。

② 工件纵向进给速度 v_f 的影响。加大纵向进给速度，每颗磨粒的切屑厚度随之增大，磨削力加大，晶格畸变、晶粒间应力加大，冷硬增大。但提高纵向进给速度，有时又会使磨削区产生较大的热量而使冷硬减弱。加工表面的冷硬状况要综合考虑上述两种因素的综合作用。

③ 工件旋转速度的影响。在工件纵向进给速度不变的情况下，提高工件的旋转速度，就会缩短砂轮对工件热作用的时间，使弱化倾向减弱，从而使表面层的冷硬增大。

④ 磨削速度的影响。在其他条件不变的情况下，提高磨削速度对表面冷硬将产生下列影响：

- 每颗磨粒切除的切屑厚度变小，减弱了塑性变形程度，表面冷硬减小；
- 磨削区的温度增高，弱化倾向增大，冷硬减少；
- 由于塑性变形速度的原因使钢的兰脆性范围向高温区转移，工件材料的塑性降低，这就降低了表层金属的强化倾向而使冷硬减弱。

由于上述原因，高速磨削条件下加工表面的冷硬程度总比普通磨削条件下的低。

假如在提高砂轮速度的同时，成比例地提高工件的纵向进给速度和工件的旋转速度，高速磨削条件下的冷硬状况不仅不比普通磨削低，有时甚至还比普通磨削时大。

(3) 砂轮粒度的影响。砂轮粒度越大，每颗磨粒的载荷越小，冷硬也越小。

在磨削淬火钢工件时，影响冷硬的规律同上。但在分析淬火钢磨削问题时，尚需考虑淬火钢的回火问题。由于磨削过程会产生极高的瞬时温度，表层金属的马氏体要转化为屈氏体或索氏体，出现软点，同时还会在表层金属中产生热应力，有时还会产生裂纹。表 5-2 列出了用各种机械加工方法（采用一般切削用量）加工钢材工件时，加工表面冷硬程度和冷硬深度的部分数据。

表 5-2 加工表面的冷硬程度及冷硬深度

加工方法	冷硬程度 N (%)		冷硬深度 h_y (μm)	
	平均值	最大值	平均值	最大值
普通车削和高速车削	120~150	200	30~50	200

续表

加工方法	冷硬程度 N (%)		冷硬深度 h_y (μm)	
	平均值	最大值	平均值	最大值
细车	140~180	220	20~60	—
端铣	140~160	200	40~100	200
圆柱铣	120~140	180	40~80	110
钻和扩	160~170	—	180~200	250
铰	—	—	—	300
拉	150~200	—	20~25	—
滚齿和插齿	160~200	—	120~150	—
剃齿	—	—	<100	—
磨非淬火碳钢	140~160	200	30~60	—
磨低碳钢	160~200	250	30~60	—
磨淬火钢	125~130	—	20~40	—
平磨	150	—	16~35	—
研磨（加研磨膏）	112~117	—	3~7	—

5.3.2 表面层金属的金相组织变化

1. 机械加工表面金相组织的变化

机械加工过程中，在工件的加工区及其临近的区域温度会急剧升高。当温度升高到超过工件材料金相组织变化的临界点时，就会发生金相组织变化。这对于一般的切削加工而言，倒不一定会严重到如此程度，但对于单位切削截面切削力特别高的某些加工方法来说，就可能出现表层金属的金相组织变化，这会严重影响零件的使用性能。

表 5-3 列出了几种常用机械加工方法的切削比压值。由表 5-3 所列数据可知，磨削加工的切削比压比其他加工方法大数十倍。磨削加工不仅切削比压特别大，而且磨削的切削速度也特别高，一般都在 35~80m/s 范围内，而其他加工方法的切削速度一般都在 10m/s 以下。综上所述可知，磨削加工切除金属的功率消耗将远远大于其他加工方法，而加工所耗电能的绝大部分都要转变为热，如果冷却效果不好，这些热量只有一小部分（约 10%）被切屑带走，相当一部分热量（约 80%）将传给被加工表面，所以磨削加工是一种典型的、容易产生加工表面金相组织变化的加工方法。

表 5-3 几种常用的机械加工方法的切削比压值

加工方法	单位切削截面的切削力 (N/mm^2)
车削	$(2\sim2.5)\times10^3$
钻削	$(3\sim3.5)\times10^3$
铣削	$(5\sim5.7)\times10^3$
磨削	$(1\sim2)\times10^5$

磨削淬火钢时，工件表面层上形成的瞬时高温将使表层金属产生以下三种金相组织变化。

(1) 若磨削区的温度未超过淬火钢的相变临界温度（碳钢的相变温度约为 720℃），工件表面将产生一层回火组织（索氏体或屈氏体），硬度比原来的回火马氏体低，一般称为回火烧伤。

(2) 若磨削区温度超过相变温度，再加上冷却液的急冷作用，表层金属会出现二次淬火马氏体组织，硬度比原来的回火马氏体高。在它的下层，因为冷却较慢，出现了硬度比原来的回火马氏体低的回火组织，一般称为淬火烧伤。

(3) 若磨削区温度超过了相变温度，而磨削过程中又没有冷却液，表层金属即产生退火组织，表层金属的硬度急剧下降，一般称为退火烧伤。

图 5-15 所示是在不同磨削条件下磨高碳淬火钢工件时所测得的硬度分布图。当磨削深度为 10μm 时，表面有一薄层回火马氏体组织，它比基体组织硬度还低；中间有一层金属比基体硬度高，这是由于磨削过程中的塑性变形引起的冷作硬化产生的。当磨削深度为 20~30μm 时，磨削温度更高，但还在相变温度以下，冷作硬化的影响减少，在表层金属中产生了比基体硬度还要低的回火马氏体组织。当磨削深度增大至 50μm 时，磨削表面的最高温度超过了相变温度，表层金属由于急冷作用产生二次淬火组织，它的硬度高于基体组织；里层金属冷却较慢，产生硬度比较低的回火组织；再往深处，硬度又逐渐上升直至未受磨削热影响的基体组织。

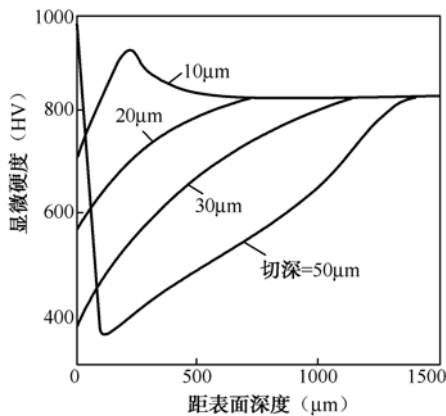


图 5-15 磨削加工表面的硬度分布

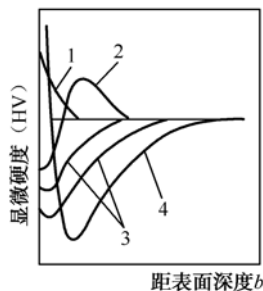


图 5-16 烧伤层的显微硬度分布图

磨削时表面出现的黄、褐、紫、青等烧伤颜色是工件表面在瞬时高温下产生的氧化膜颜色。不同的烧伤颜色表示表面受到不同程度的烧伤。但表面没有烧伤颜色并不等于表层金属未受烧伤。例如，在磨削过程中，采用过大的磨削用量，造成了很深的烧伤，在以后的无进给磨削中，有可能将表面一层烧伤颜色磨去，但这并不意味着里层金属未受烧伤。

2. 评定烧伤的方法

常用以下几种方法评定烧伤。

(1) 观色法：此法立足于不同性质的烧伤组织具有不同的光学性质（反射、干涉等），因而会在工件表面上呈现出不同的色彩。人们根据烧伤表面上看到的黄、褐、紫、青等烧伤颜色，便可鉴别它属于哪一类烧伤。有人分析，用观色法所能鉴别的烧伤，其温度多在 500℃ 以上。

(2) 酸洗法：将已加工完的工件表面在 3%~5% 的硝酸溶液中浸洗 30~40s 后取出，在灯光下观察，如果表面呈暗灰色则可判断工件表面上无烧伤，如果表面呈黑色则说明工件已经烧伤。

(3) 金相组织法: 通过一定的方法观察和检查表层金属金相组织的变化来评定烧伤的情况。

(4) 显微硬度法: 不同性质的烧伤具有不同性质的显微硬度分布。如图 5-16 所示, 曲线 1 表示加工软钢时, 表层金属在冷态塑性变形作用下, 硬度有所提高, 越往深处逐渐接近正常硬度, 当用砂轮精磨工件时, 常常出现这种状态。曲线 2 表示在工件表面产生一薄层轻微的软化薄层, 表层的下边有一层加工硬化层, 当用钝砂轮进行半精磨时常常出现这种状态。曲线 3 是普通磨削常遇到的一种情况, 表层金属有一层回火烧伤组织。曲线 4 表示工件表面上有一层二次淬火组织, 在它的下边则是回火组织。可以推断, 这是一种淬火烧伤的典型情况。

3. 改善加工表面金相组织的工艺途径

磨削热是造成磨削烧伤的根源, 故改善加工表面金相组织可有两个途径: 一是尽可能减少磨削热的产生; 二是改善冷却, 尽量使产生的热量少传入工件。现将有关问题分述如下。

1) 正确选用砂轮

磨削导热性差的材料, 应注意选择砂轮的硬度、结合剂和组织。砂轮在磨钝之后, 磨削力要增大, 烧伤工件表面的可能性就大, 为避免产生烧伤, 应选较软的砂轮。选择具有一定弹性的结合剂(如橡胶结合剂、树脂结合剂)也有助于避免烧伤; 单个磨粒磨削力较大时, 结合剂的弹性能够使磨粒做一定的径向退让, 以缓和因磨削力突增而引起烧伤。此外, 为了减少砂轮之间的摩擦热, 在砂轮的气孔内浸入石蜡之类的润滑物质, 对降低磨削区的温度、防止工件烧伤也有一定效果。目前也有使用内冷却的专用砂轮来解决此类问题的成功方案。

2) 合理选择磨削用量(以平磨为例)

(1) 磨削深度 a_p 。磨削深度 a_p 对磨削温度影响极大, 如图 5-17 所示, 从减轻烧伤的角度看, a_p 不宜过大。

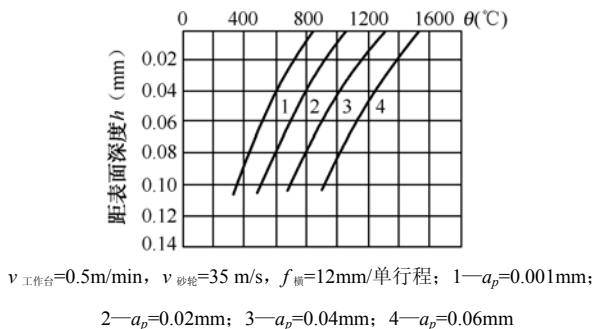


图 5-17 磨削深度 a_p 对磨削温度分布的影响

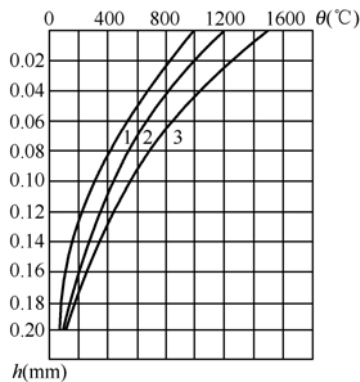
(2) 横向进给量。加大横向进给量 $f_{\text{横}}$, 对减轻烧伤有利。如图 5-18 所示, 为减轻烧伤, 宜选用较大的 $f_{\text{横}}$ 。

磨削热 Q 与 $f_{\text{横}}$ 有下述关系:

$$Q=Kf_{\text{横}}^{0.7}$$

式中, K 取决于其他磨削条件的系数。

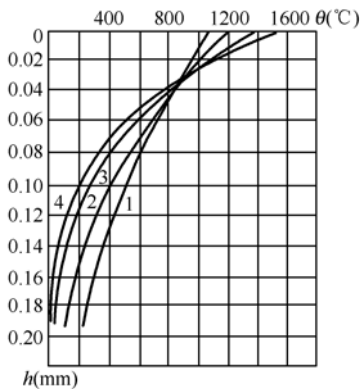
由于磨削热与 $f_{\text{横}}$ 的 0.7 次方成正比, 而承受热源作用的面积与 $f_{\text{横}}$ 的一次方成正比, 所以加大 $f_{\text{横}}$ 之后, 磨削区单位面积的磨削热反而降低了。但增大 $f_{\text{横}}$ 会使表面粗糙度增大, 为了弥补此缺陷, 最好使用较宽的砂轮。



$v_{\text{工作台}}=0.1\text{m/min}$; $v_{\text{砂轮}}=35\text{m/s}$, $a_p=0.02\text{mm}$; 1— $f_{\text{横}}=24\text{mm/单行程}$
2— $f_{\text{横}}=12\text{mm/单行程}$; 3— $f_{\text{横}}=6\text{mm/单行程}$

图 5-18 $f_{\text{横}}$ 对磨削温度分布的影响

(3) 工件的回转速度 $v_{\text{工}}$ 。提高工件的回转速度 $v_{\text{工}}$ ，磨削表面的温度升高，但其增长速度与磨削深度的影响相比少得多。此外，加大 $v_{\text{工}}$ 还有减薄烧伤层深度的作用，如图 5-19 所示。



$a_p=0.02\text{mm}$; $f_{\text{横}}=12\text{mm/单行程}$; $v_{\text{磨}}=35\text{m/s}$; 1— $v_{\text{工}}=0.5\text{m/s}$; 2— $v_{\text{工}}=1.0\text{m/s}$;
3— $v_{\text{工}}=2.0\text{m/s}$; 4— $v_{\text{工}}=3.0\text{m/s}$

图 5-19 工件速度对磨削温度的影响

从减轻烧伤而同时又能尽可能地保持较高的生产率的角度考虑，在选择磨削用量时，应选用较大的 $v_{\text{工}}$ 和较小的 a_p 为宜。

增大 $v_{\text{工}}$ ，会使表面粗糙度增大。为了弥补此缺陷，可以提高砂轮速度 $v_{\text{磨}}$ 。生产实践也证明，同时提高砂轮速度和工件速度，可以避免产生磨削烧伤。图 5-20 所示是磨削 18CrNiWA 钢时不出现烧伤的工件速度和砂轮速度的临界比值曲线，曲线下方是容易出现烧伤的区域（Ⅰ区），曲线上方是安全区（Ⅱ区）。

3) 改善冷却条件

实验表明，只要设法保证在每秒钟内确有 2mL 的冷却水引入磨削区，将有相当可观的热量被带走，就可以有效地避免发生磨削烧伤。然而，目前通用的冷却方法（如图 5-21 所示）效果很差，实际上没有多少冷却水真正能进入 AB 磨削区。

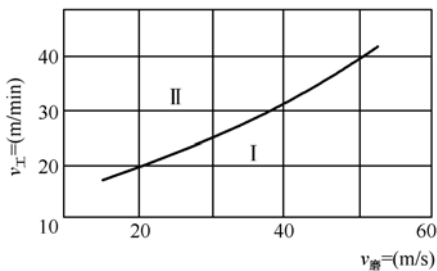


图 5-20 工件和砂轮速度的无烧伤临界比值

内冷却则是一种比较有效的冷却方法，如图 5-22 所示。内冷却装置的工作原理如下：经过严格过滤的冷却液通过中空主轴法兰套引入砂轮的3内，由于离心力作用，这些冷却液就会通过砂轮内部的孔隙向砂轮四周的边缘洒出，因此冷却水就有可能直接注入磨削区。

采用开槽砂轮（如图 5-23 所示）可以改善磨削区的冷却条件。

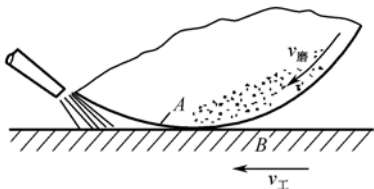
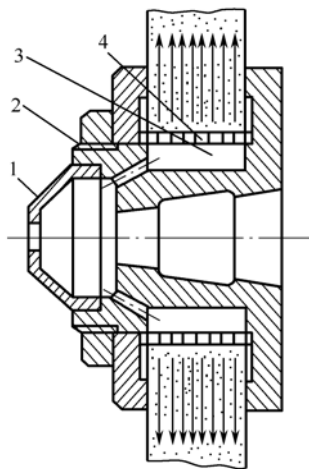


图 5-21 目前通用的冷却方法



1—锥形盖；2—通道孔；3—砂轮中心腔；4—有径向小孔的薄壁套

图 5-22 内冷却装置

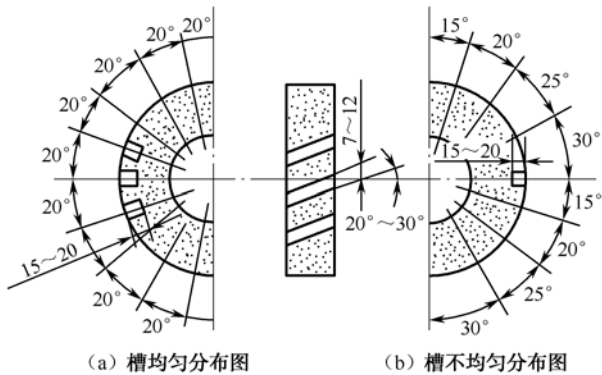


图 5-23 开槽砂轮

5.3.3 表面层金属的残余应力

切削加工时，在工件表面层内产生残余应力的主要原因如下：

(1) 切削时在加工表面的金属层内有塑性变形发生，使表层金属的比重减少（比容加大）。比重减少程度与塑性变形的程度有关。由于塑性变形只在表面层中产生，而表面层金属比容增大、体积膨胀，不可避免地要受到与它相连的里层金属的阻止，所以就在表面层内产生了压缩

残余应力，而在里层金属中产生拉伸残余应力。

(2) 当刀具从被加工表面上切除切屑时，表层金属的纤维被拉长，刀具后刀面跟已加工表面的摩擦又加剧了这种拉伸作用。刀具切离后，拉伸弹性变形逐渐恢复，而拉伸塑性变形则不能恢复。表层金属的拉伸塑性变形受到与它相连的里层未发生塑性变形金属的阻止，所以，就在表层金属中产生了压缩残余应力，而在里层金属中产生拉伸残余应力。

(3) 切削加工中，切削区会有大量的切削热产生，工件表面的温度往往很高。例如，在外圆磨削时，表层金属的平均温度高达 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，瞬时磨削温度更是大大超过该温度，可高达 $800\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。图 5-24 (a) 所示为工件上温度分布的示意图。 t_p 点相当于金属具有高塑性的温度，温度高于 t_p 的表面金属层，没有残余应力。 t_n 为标准室温， t_m 为熔化温度。

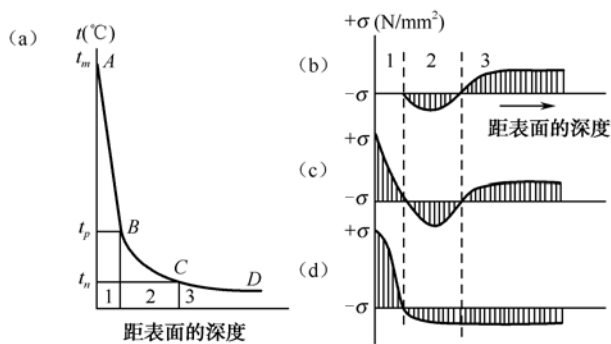


图 5-24 因切削热在表层金属产生拉伸残余应力的示意图

切削时工件表面在切削热的作用下，表层金属 1 的温度超过 t_p ，故处于没有残余应力作用的塑性状态中，如图 5-24 (b) 所示。金属层 2 的温度在 t_n 与 t_p 之间，这层金属受热作用后要膨胀，表面金属层 1 因处于完全塑性状态，所以它对金属层 2 受热膨胀不起阻止作用，但金属层 2 的膨胀却受到处于室温状态的里层金属 3 的阻止。因此，金属层 2 产生瞬时压缩残余应力，而金属层 3 则产生瞬时拉伸残余应力，如图 5-24 (b) 所示。

切削过程结束之后，待金属层 1 冷却到低于 t_p ，即从完全塑性状态转变到不完全塑性状态时，金属层 1 冷却要收缩，但下面的金属层 2 阻止它收缩。因此，就在金属层 1 内产生拉伸残余应力，而在金属层 2 内的压缩应力还要进一步加大，此时金属层 3 的拉伸应力有所减小，如图 5-24 (c) 所示。

当表面层金属继续冷却到里外温度完全相等时，表面层金属 1 继续缩小尺寸，它受到里层金属的阻碍，因此金属层 1 内的拉伸应力还要继续加大，而金属层 2 的压缩应力则扩展到金属层 2 和金属层 3 内，如图 5-24 (d) 所示。

(4) 切削过程中表层金属的结构转化所引起的残余应力。不同的金相组织具有不同的比重 ($\gamma_{\text{马氏体}}=7.75$; $\gamma_{\text{奥氏体}}=7.96$; $\gamma_{\text{铁素体}}=7.88$, $\gamma_{\text{珠光体}}=7.78$)，也就具有不同的比容。如果表面金属层产生了金相组织的变化，由于表层金属比容发生变化，必然受到与之相连的基体金属的阻碍，所以就有残余应力产生。下面以淬火钢磨削为例进行说明。

淬火钢原来的组织是马氏体，磨削加工中，表面层有可能发生回火烧伤而转化为接近珠光体的屈氏体或索氏体，表层金属比重从 7.75 增至 7.78，比容减少，表面层金属由于相变而产生的收缩受到基体金属的阻碍，使之不能自由收缩，因此就在表面层产生了拉伸残余应力，里层金属则产生与之相平衡的压缩残余应力。

磨削加工时产生的残余应力主要与磨削热有关。

当磨削深度不大时（如 $a_p=0.005\text{mm}$ ），塑性变形的影响占优势，因此在磨削表面形成压缩残余应力。继续增大磨削深度，每颗磨粒的负荷加大，磨削区的摩擦力加大，塑性变形加剧，磨削热随之增长。起先是热因素的作用占优势，在表面层产生拉伸残余应力，且随着磨削深度的增大，表层金属的残余拉伸应力逐渐加大；但当磨削深度增大到一定值后，塑性变形因素占优势，拉伸应力逐渐变小，表层金属呈现压缩残余应力状态。

加大工件的回转速度和进给速度，砂轮与工件热作用的时间逐渐缩短，热因素的影响逐渐减小，塑性变形因素的影响逐渐加大。这样，表层金属中产生拉伸残余应力的趋势就逐渐减小，而产生压缩残余应力的趋势逐渐增大。

5.3.4 表面层强化工艺

1. 表面强化工艺

这里所说的表面强化工艺是指通过冷压加工方法使表面层金属发生冷态塑性变形，以降低表面粗糙度，提高表面硬度，并在表面层产生残余压应力。至于表面镀铬，以及其他表面化学热处理等强化工艺，不属于本课程的研究范围，这里不做介绍。

冷压加工强化工艺的效果非常显著，加工方法又非常简便，所以应用十分广泛。常用的一些冷压加工方法说明如下。

1) 喷丸强化

利用大量快速运动的珠丸打击被加工零件表面，使工件表面产生冷硬层和残余压应力，有利于提高零件的抗疲劳强度和使用寿命。所用珠丸或是铸铁的，或是切成小段的钢丝（使用一段时间之后，自然也变成球状），其尺寸为 $0.2\sim4\text{mm}$ 。喷丸强化最常用的设备是压缩空气喷丸装置和机械式喷丸装置。这些装置使珠丸能以 $35\sim50\text{m/s}$ 的速度喷出。

喷丸强化主要用于强化形状复杂、不宜用其他方法强化的工件。对于板弹簧、螺旋弹簧卷、连杆、齿轮、焊缝等效果显著，详见表 5-4。若在零件上有凹槽、凸起等应力集中的部位，珠丸一般应小于其过渡圆弧半径，以使这些部位也得到强化。常用的一些方法如图 5-25 所示。

在喷丸强化的基础上，目前已出现了液体磨料强化。磨料在 $(400\sim800)\text{ kPa}$ 下高速喷出，射向工件表面，使工件表面产生数十微米的塑性变形层，产生表面残余压应力。

表 5-4 喷丸加工对零件使用寿命的影响

零 件 名 称	提高使用寿命（ % ）
板弹簧	600
螺旋弹簧卷	5500
连杆	1000
半轴	1900
齿轮	400
曲轴	2900
履带销	1000
通风机焊缝	200

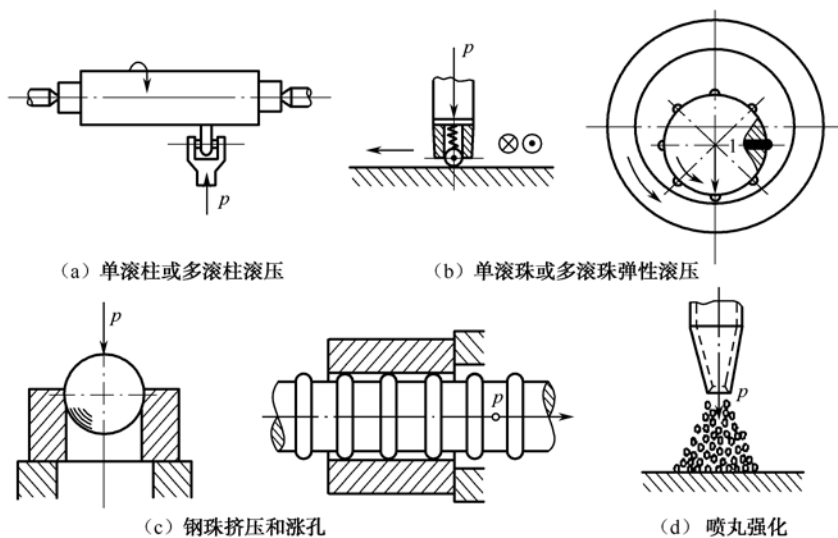


图 5-25 常用的冷压强化工艺方法

2) 滚压加工

滚压加工是利用经过淬硬和精细抛光过的滚轮或滚珠，在常温状态下对金属零件表面进行挤压，将表层金属凸起的部分向下压，凹下的部分往上挤，逐步将前工序留下的波峰压平，从而修正零件表面的微观几何形状。此外，它还能使零件表面金属组织细化，形成压缩残余应力，达到表面强化的目的。

滚压加工可降低表面粗糙度 3~5 级，表面硬度一般可提高 10%~40%，表层金属耐疲劳强度一般可提高 30%~50%。滚压加工不需要特殊设备，只要配备一套合用的滚压工具，在普通的车床、镗床、钻床、刨床上就能滚压外圆、内孔、平面和其他表面。重型机械制造中，在精加工设备能力比较薄弱的中小型工厂里，滚压加工可以代替（或部分代替）磨削、研磨、抛光等精加工工序。常见的加工方法如图 5-26 所示。

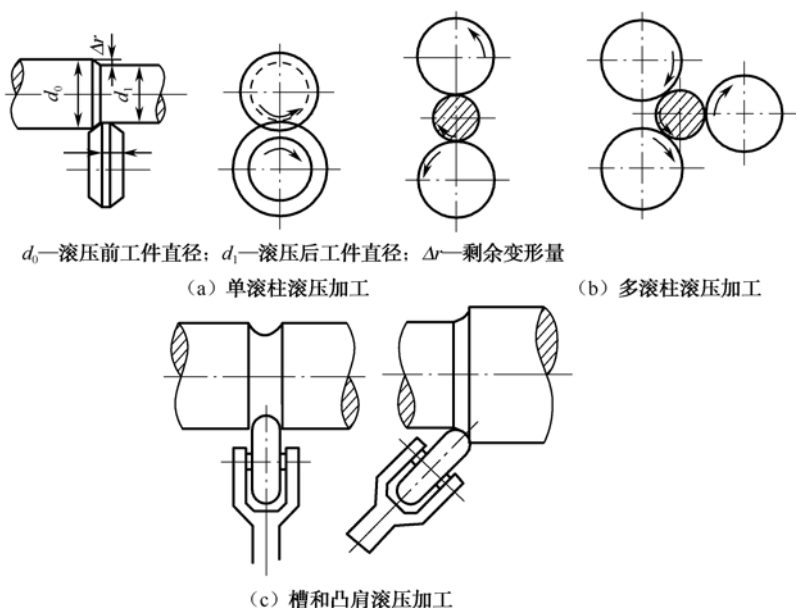


图 5-26 典型的滚柱滚压加工

滚压加工对零件的疲劳强度的提高是非常显著的。对于有应力集中的试件,滚压加工的作用更为明显。

5.3.5 减小残余拉应力、防止表面烧伤和裂纹的工艺措施

当零件表面具有残余拉应力时,其疲劳强度会明显下降,特别是对有应力集中或在有腐蚀性介质中工作的零件,残余拉应力对零件疲劳强度的影响更为突出。为此,应尽可能在机械加工中减小残余拉应力,最好能避免产生残余拉应力。

磨削加工过程中,产生残余拉应力、烧伤和裂纹的主要原因是磨削区的温度过高。为降低磨削区温度,可从减少磨削热的产生和加速磨削热的传出这两条途径入手,其具体措施加下。

1. 合理选择磨削用量

为合理地选取磨削用量,首先必须分析磨削区表面温度与磨削用量之间的关系。现以平面磨削为例,按接近实际加工情况将磨削区简化为连续均匀热源 AB 只向工件表面下方传导的半无限大热场的计算问题(如图 5-27 所示)。通过有关温度场的理论分析和计算可知,磨削区表面温度 θ 与单位时间、单位面积的发热量 q 、热源作用的时间 t 、工件的导热系数 λ 及工件的导热系数 a 有关,即

$$\theta = \frac{q\sqrt{(4at)/\pi}}{\lambda}$$

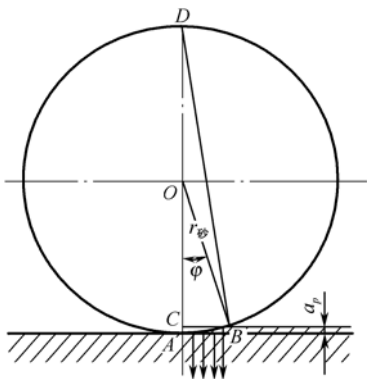


图 5-27 平面磨削的热传导方向及热源面积计算模型

如图 5-27 所示,磨削过程中磨削区内的连续均匀热源 AB 在单位时间内的发热量 Q 正比于磨削功率 $P_{\text{磨}}$ ($F_Z \cdot v_{\text{砂}}$), 而

$$F_Z = C_{F_Z} \cdot v_{\text{工}}^{0.7} \cdot a_p^{0.6} \cdot f^{0.7} / v_{\text{砂}}^{0.75}$$

故

$$Q = C_Q \cdot C_{F_Z} \cdot v_{\text{工}}^{0.7} \cdot a_p^{0.6} \cdot f^{0.7} \cdot v_{\text{砂}}^{0.25}$$

因为磨削深度 a_p 很小,可认为 $\widehat{AB} \approx \overline{AB} \approx \overline{BC}$, 则热源面积为

$$S = \overline{AB} \cdot f = \sqrt{2r_{\text{砂}} \cdot a_p} \cdot f = C_S \cdot a_p^{0.5} \cdot f; \quad q = Q/S = C_q \cdot v_{\text{工}}^{0.7} \cdot a_p^{0.1} \cdot v_{\text{砂}}^{0.25} \cdot f^{-0.3}$$

而热源的作用时间 $t = \overline{BC} / v_{\text{工}} \approx \overline{AB} / v_{\text{工}} = C_S \cdot a_p^{0.5} / v_{\text{工}}$, 将 q 、 t 之值代入前式得:

$$\theta = (C_q / \lambda) \sqrt{4aC_s / \pi} \cdot v_{\text{工}}^{0.2} \cdot a_p^{0.35} \cdot v_{\text{砂}}^{0.25} \cdot f^{-0.3} = C_{\theta} \cdot v_{\text{工}}^{0.2} \cdot a_p^{0.35} \cdot v_{\text{砂}}^{0.25} \cdot f^{-0.3}$$

上述各式中的 C_Q 、 C_S 、 C_q 、 C_{θ} 均为常数。

由上述磨削区表面温度与磨削用量的关系式可知，磨削深度 a_p 的增大会使表面温度升高，工件速度 $v_{\text{工}}$ 和砂轮速度 $v_{\text{砂}}$ 的增大也会影响表面温度的升高，但影响的程度不如磨削深度大。横向进给量 f 的增大反而会使表面温度下降。当进一步观察和分析 $v_{\text{工}}$ 对磨削区温度场的影响时，可以看到 $v_{\text{工}}$ 越大，表面附近处的温度梯度越大，即曾发生高温的表面金属层越薄。从表 5-5 可以看出曾发生 600℃ 以上温度的金属层厚度和曾发生 800℃ 以上温度的金属层厚度都随 $v_{\text{工}}$ 的增大而减少。

表 5-5 工件速度 $v_{\text{工}}$ 与表面高温金属厚度的关系

工件速度 $v_{\text{工}}$ (m/s)	表面温度 θ (℃)	处在 600℃ 以上的金属层厚度 (mm)	处在 800℃ 以上的金属层厚度 (mm)
0.5	1075	0.096	0.043
1.0	1206	0.072	0.042
2.0	1380	0.060	0.040
3.0	1510	0.052	0.039

如表 5-5 所示，温度在 600℃ 左右是淬火钢最易回火的温度，只要保持该温度 0.5s 左右马氏体即开始分解转化为屈氏体，从而硬度下降并产生残余拉应力。低于此温度，如 400℃，则要保持 10s 左右才有变化。对于磨削加工来说，表面处于磨削区的时间 t 约在百分之一秒以内，一出磨削区就会得到有效冷却，故高温保持时间不可能达到几秒钟之久，因此来不及回火。根据表 5-5 数据，可以认为进一步提高 $v_{\text{工}}$ 能减轻磨削表面的烧伤。所以，提高 $v_{\text{工}}$ 是一项既能减轻磨削烧伤又能提高劳动生产率的有效措施。实践证明，同时提高砂轮速度和工件速度可以避免烧伤。

2. 提高冷却效果

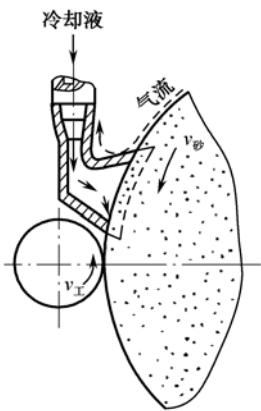


图 5-28 带有空气挡板的冷却液喷嘴

提高冷却效果的具体改进的措施如下：

(1) 采用高压大流量冷却。这样不但能加强冷却作用，而且还可以对砂轮表面进行冲洗，使其空隙不易被切屑堵塞。例如，有的磨床就是使用流量每分钟 200L 和压力为 8~12 个大气压的冷却液。为防止冷却液飞溅，机床需安装有防护罩。

(2) 在砂轮上安装带有空气挡板的冷却液喷嘴。为减轻高速旋转时，砂轮表面的高压附着气流作用，可加装如图 5-28 所示的带有空气挡板的冷却液喷嘴，以使冷却液能顺利地喷注到磨削区，这对于高速磨削更为必要。

(3) 利用内冷却砂轮实现有效的冷却作用。

3. 提高砂轮的磨削性能

要解决磨削烧伤问题，除了合理选择磨削用量、改进冷却方法、改善传热条件等各项措施外，在不影响磨削生产率的前提下，降低磨削区发热强度也是一个主要措施。如前所述，磨削

时的单位切削截面切削力为 $(1\sim 2)\times 10^5\text{N/mm}^2$, 这已数十倍地超过了材料的强度极限。产生如此大的切削力, 主要不是由被加工材料的强度抗力造成的, 而是由不正常的极大摩擦力引起的。这说明磨削过程是一个很理想的切削过程, 切削所占的比重很小, 大部分磨粒只是与加工面进行摩擦而不是进行切削。所以, 改善切削过程就可以在不影响生产率的情况下, 减少功率消耗而达到降低磨削区温度的目的。

磨削时, 作为刀刃的刚玉磨粒, 其刃口是非常纯的, 即使最尖锐的刃口也有相当大的圆弧半径而呈球面状。而在磨削过程中, 每个磨粒的切削厚度常在 $0.02\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 范围内。在大多数情况下, 磨粒所“切除”的那层金属只是被挤压了一下, 并没有切除。这层金属只是在后续的大量磨粒反复挤压多次而呈现疲劳时才剥落。因此, 在切削抗力中绝大部分是摩擦力。如果磨粒的切削刃口再尖锐锋利些, 磨削力会下降, 功率消耗也会减少, 从而使磨削区的温度也相应下降。但磨粒的刃尖是自然形成的, 刃尖的圆弧半径 ρ 取决于磨粒的硬度和强度。若磨粒的硬度和强度不够, 就不能得到很小的 ρ ; 即使偶然得到了, 在磨削时也不能保持。磨料硬度和强度的提高显然是提高砂轮磨削性能的一个重要方向。

金刚石砂轮磨削硬质合金不产生烧伤和裂纹的主要原因是磨粒的强度、硬度大, 刃尖锋利, 改善了切除薄切屑的条件, 从而使磨削力及磨削区温度下降。另一个原因是金刚石与金属在无润滑液情况下的摩擦系数极低, 只有 0.05。

立方氮化硼的应用极大地提高了加工硬质合金的效率。虽然立方氮化硼在硬度和强度上略逊于金刚石, 但它能在高达 1360°C (金刚石是 920°C) 的高温下工作。

由于磨料的磨削性能有较大的随机性, 所以无法确保砂轮工作表面每颗磨粒的高质量。对于那些质量差和较快用钝的磨粒, 因为刃尖较钝、摩擦力较大, 可能引起磨削表面的局部烧伤, 一般总是希望它们能在工作时自动地从砂轮上脱落下来, 即希望结合剂的黏结力不要太强, 砂轮软一些。

也可以采用具有一定弹性的结合剂来解决磨削烧伤问题。例如, 用橡胶作为结合剂, 当某种偶然性因素导致磨削力增大时, 磨粒就会做一定程度的退让, 使切削深度自动下降, 由于切削力不会过大而避免了表面局部烧伤。树脂结合剂也有类似性能。

5.4 控制加工表面质量的途径

5.4.1 控制加工工艺参数

综上所述, 在加工过程中影响表面质量的因素是非常复杂的。为了获得要求的表面质量, 就必须对加工方法、切削参数进行适当的控制。控制表面质量常会增加加工成本, 影响加工效率, 所以对于一般零件宜采用正常的加工工艺保证表面质量, 就不必再提出过高要求。而对于一些直接影响产品性能、寿命和安全工作的重要零件的重要表面, 就有必要加以控制了。例如, 承受高应力交变载荷的零件需要控制受力表面不产生裂纹与残余拉应力; 轴承沟道为了提高接触疲劳强度, 必须控制表面不产生磨削烧伤和微观裂纹; 量具中的块规则主要应保证其尺寸精度及稳定性, 故必须严格控制表面粗糙度和残余应力等。类似这样的零件表面, 就必须选用适合的加工工艺, 严格控制表面质量, 并进行必要的检查。

磨削作为一种重要的工艺方法,近年来发展很快。它既可用于低粗糙度磨削代替光整加工,又可用做高效磨削,使粗、精加工同时完成。但它也是一种影响因素众多、对产品表面质量有很大影响的工艺方法。因此,对于直接影响产品性能、寿命、安全的重要零部件,在采用磨削方法加工时必须控制磨削用量。

前面曾讨论过磨削用量对磨削表面质量单个组成部分的影响,现在综合起来看,有些参数的选用对表面质量的影响是相互矛盾的。例如修整砂轮,从降低粗糙度考虑,砂轮应修整得细些,但是却常因此引起工件表面的磨削烧伤;为了避免工件烧伤,工件速度常选得较大,但这样又会增大表面粗糙度和容易引起颤振;采用小磨削用量却又降低了生产效率,而且不同的材料其磨削性能也不一样。所以,光凭经验或靠手册并不能全面地保证加工质量。生产中比较可行的办法是通过试验来确定磨削用量。可以先按初步选定的磨削用量试磨工件,然后通过检查试件的金相组织变化和测定表面层的显微硬度变化,就可以知道磨削表面层的热损伤情况,据此调整磨削用量直至最后确定下来。

近年来国内外对磨削用量最佳化进行了不少理论研究工作,对如何实现:①高表面质量,包括无烧伤、无裂纹、达到要求的表面粗糙度和表面残余应力;②动态稳定性;③低成本;④高切除率等进行了探讨,分析了磨削用量、磨削力、磨削热与表面质量之间的相互关系,并用图表来表示各项参数的最佳组合。还有在数控磨削过程中,通过计算机指令控制磨削参数。另外还有靠控制磨削温度来保证工件质量的方法,即利用夹在砂轮间的铜或铝箔作为热电偶的一极,在磨削过程中连续测量磨削区的温度,然后控制磨削用量。

5.4.2 采用适当的精加工与光整加工方法作为终加工工序

超精加工、珩磨等都是利用磨条以一定的压力压在工件的被加工表面上,并做相对运动以降低工件表面粗糙度和提高精度的工艺方法,一般用于粗糙度为 $Ra < 0.1\mu\text{m}$ 表面的加工。由于切削速度低、磨削压强小,所以加工时产生很少热量,不会产生热损伤,并在工件表面层产生残余压应力。如果加工余量合适,还可以去除磨削加工的变质层。

采用超精加工、珩磨工艺虽然比直接采用精磨达到要求的粗糙度要多增加一道工序,但由于这些加工方法都是靠加工表面自身定位进行加工的,所以机床结构简单,精度要求不高,而且大多设计成多工位机床,并能进行多机操作,所以生产效率较高,加工成本较低。由于上述优点,它在大批大量生产中应用得比较广泛。例如,在轴承制造中为了提高轴承的接触疲劳强度和寿命,普遍采用超精加工来加工套圈和滚子的滚道表面。

1. 超精加工

用细粒度的磨条以一定压力压在旋转的工件表面上,并在轴向做往复振荡进行微量切除的光整加工方法,常用于加工内外圆柱、圆锥面和滚动轴承套圈的滚道。

超精加工后表面粗糙度可达 $Ra \leq 0.012\mu\text{m}$, 表面加工纹路由波纹曲线相互交叉形成(如图 5-29 所示)。这样的表面容易存储油膜,提高润滑效果,因此耐磨性好。由于切削区温度低,表面层有轻度塑性变形,所以表面带有较低的残余压应力。

一般超精加工只去除 $5 \sim 8\mu\text{m}$ 的余量。若是需要提高工件的形状精度及去掉磨削变质层,必须去除余量 0.03mm 左右,此时可将超精加工分成粗、精两阶段进行。粗加工时采用较粗粒度的磨条、较大转速和磨条压力;精加工时取得较小,磨条压力一般在 100kPa 以下。

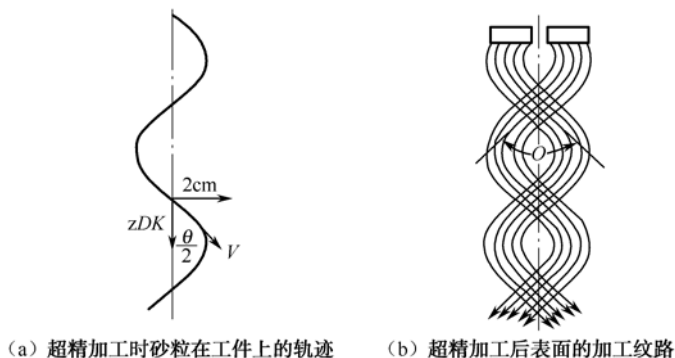


图 5-29 超精加工表面加工纹路的形成

2. 珩磨

它与超精加工类似，只是使用的工具不同以及运动方式不同。珩磨头带有若干块细粒度的磨条靠机械或液压的作用涨紧和施加一定压力在工件表面上，并相对工件做旋转与往复运动，结果在工件表面上形成由螺旋线交叉而成的网状纹路（如图 5-30 所示）。这种方法主要用于内孔的光整加工，孔径 $\phi 8 \sim \phi 1200\text{mm}$ ，长径比 L/D 可达 10 或 10 以上。

由于珩磨时使用多块较长的磨条，所以与孔表面的接触面积较大，加工效率较高。珩磨头与机床是浮动连接的，所以珩磨磨条可以和孔壁有很好的贴合，加工时不改变孔的中心位置。珩磨时一般采用 $280^\# \sim \text{W}20$ 的磨条，珩磨压力为 $(200 \sim 500) \text{ kPa}$ ，交叉角选择在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内较好。珩磨余量为 $0.02 \sim 0.03\text{mm}$ ，珩磨后粗糙度可达 $Ra \leq 0.012\mu\text{m}$ ，孔的形状精度可达 0.002mm 。近年来采用人造金刚石、立方氮化硼磨料制作的磨条，效率显著提高，珩磨压力增至 $1 \sim 1.5\text{MPa}$ ，珩磨余量可达 $0.05 \sim 0.1\text{mm}$ ，磨削区温度却很低，表面不产生变质层，因而珩磨可取代内圆磨并能直接获得良好的表面质量。

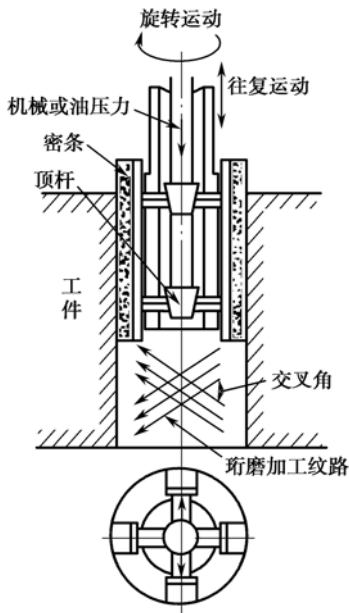


图 5-30 珩磨加工示意图

3. 研磨

将研磨剂涂敷（干式）或浇注（湿式）在研具与工件间，工件与研具在一定压力下做不断变更方向的相对运动，在磨粒的作用下逐步刮擦并微量切除工件表面的很薄的金属层（如图 5-31 所示）。这种方法可适用于各种表面的加工，粗糙度可达 $Ra \leq 0.012\mu\text{m}$ ，精度可达 5 级以上。研磨剂一般采用煤油、润滑油或油脂与研磨粉混合而成。有时还加入活性添加剂如油酸、硬脂酸等。研磨过程有一定的化学作用。研具一般采用比工件软的材料制成，常用的有细小珠光体铸铁、夹布胶木、玻璃、紫铜等。一般研磨效率较低，且要求工人的技术熟练程度较高。在研磨较软材料时，宜将研磨粉压嵌在研具上，进行研磨，以防止研磨粉嵌入工件表面。

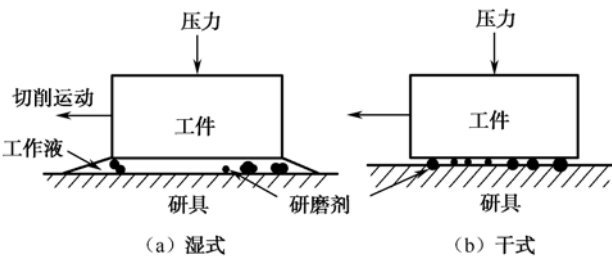


图 5-31 研磨加工原理

若将配合偶件进行对研，可以达到很好的气、液密封的配合，但是对研偶件只能成对使用，不具有互换性。

4. 抛光

这是利用布轮、布盘等软的研具涂上抛光膏抛光工件的表面，靠抛光膏的机械刮擦和化学作用去掉表面粗糙度的峰顶，使表面获得光泽镜面。抛光时一般去不掉余量，所以不能提高工件的精度甚至还会损坏原有精度。经过抛光的表面能减小残余拉应力值。

5.4.3 采用表面强化工艺

对于承受高应力、交变载荷的零件，可以采用喷丸、滚压、辗光等表面强化工艺使表面层产生残余压应力和冷作硬化并降低表面粗糙度，同时消除磨削等工序的残余拉应力，因此可大

大提高疲劳强度及抗应力腐蚀性能。借助强化工艺还可以用次等材料替代优质材料，以节约贵重材料。但是采用强化工艺时应注意不要造成过度硬化，过度硬化会使表面层完全失去塑性性质甚至引起显微裂纹和材料剥落，带来不良的后果。因此，采用强化工艺必须控制好工艺参数以获得要求的强化表面。喷丸和滚压在前述章节已经阐述过，这里重点介绍辗光。

近年来采用了金刚石工具辗光工件表面的新方法，效果显著（如图 5-32 所示）。金刚石工具修整成具有半径为 $1\sim 3\text{mm}$ 、粗糙度为 $Ra \leq 0.012\mu\text{m}$ 的球面或圆柱面。由于金刚石的物理机械性能高，且与金属接触时摩擦系数小，所以消耗的动力和能

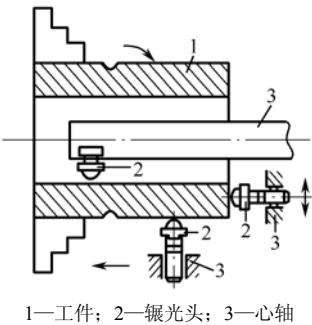


图 5-32 金刚石辗光加工原理

量小,生产效率和表面质量高。经金刚石辗光后工件表面产生压缩应力,工件疲劳强度显著提高。

5.4.4 表面质量的检查

目前除了表面粗糙度有国家标准及相应的检查方法外,表面质量的其余项目均无检验标准,也缺乏完善的无损检查方法。通常都是凭经验根据产品的要求与加工方法确定必须检查的项目。一般零件除检查表面粗糙度外,其余项目可以靠工艺保证,不再进行检查。对于重要零件的表面,则必须根据需要决定检查项目。破坏性的检查方法只能用于抽检或验证工艺的合理性。表面质量的检查项目和评定方法有以下几项。

(1) 表面粗糙度:用轮廓检查仪、双管显微镜或干涉显微镜等测定表面粗糙度,按国家标准进行评定。表面的划痕、坑点等缺陷靠目测检查,大量生产中已开始采用光电检查仪代替目测检查表面缺陷。

(2) 波度:一般在圆度仪上进行检查测出波度值。因为目前国家尚未制定标准,个别工厂、企业根据产品的性能要求自己制定工厂、企业的暂行标准,并按照进行检查。

(3) 裂纹等微观缺陷:可用以下方法和显微镜配合进行检查,大量生产中可用自动光学扫描代替目测检查。

① 磁粉探伤法:将零件磁化后,在裂纹缺陷处就会产生漏磁场,当浇上磁铁粉悬浮液后,铁粉即沿着缺陷所形成的磁力线分布。此法检查灵敏度高,能可靠地显现表面的细小裂纹和表面下的裂纹。

② 荧光或着色检查:利用荧光剂或有色液体的渗透作用显示出裂纹,主要用于不能磁化的材料的探伤。

③ 酸蚀检查:裂纹等缺陷经腐蚀后可提高清晰度。

(4) 金相组织变化:用酸蚀法检查。不同金相组织具有不同的耐腐蚀性能。经酸蚀后,正常组织为均匀的灰色,回火组织为黑色或灰黑色,二次淬火组织为灰白色,呈条状、点状、块状的花纹分布。

(5) 表面显微硬度变化:用维氏硬度计测定。若要测得表面层的硬度分布,可将试件加工出 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 的斜面,即可将表面层厚度 h 放大25倍左右在 l 长上测定(如图5-33所示)。

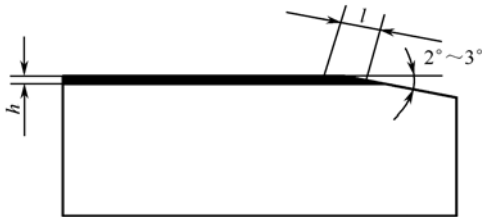


图 5-33 测定表面层显微硬度的试件

(6) 残余应力测定。

① 酸腐蚀法:表面有较大拉应力时经酸腐蚀后即出现裂纹,可在生产中很方便地使用。

② 逐层去除法:可以测定表面层的应力分布。该方法是靠电介腐蚀逐层去除表面层,因为内应力重新平衡引起零件的变形,测其变形量即可计算得到残余应力值。

③ X 射线衍射法：用 X 射线可测得原子间距的变化。当存在残余应力时，金属的原子间距产生变化。间距大于正常组织时为拉应力，反之为压应力。此法可较精确地测定表面残余应力。当需测定表面层应力分布时，应于逐层去除后测定。由于此法效率甚低，难以在生产中直接使用，国外已发展了快速 X 射线衍射仪，可以在几分钟之内确定残余应力值。

5.5

机械加工中的振动及其控制措施

5.5.1

机械加工中的振动及其分类

机械加工过程中，在工件和刀具之间常常产生振动。产生振动时，工艺系统的正常切削过程便受到干扰和破坏，从而使零件加工表面出现振纹，降低了零件的加工精度和表面质量。强烈的振动会使切削过程无法进行，甚至造成刀具“崩刃”。振动影响刀具的耐用度和机床的使用寿命，还会发出刺耳的噪声，恶化了工作环境，影响工人的身体健康。

随着现代工业的发展，特别是军事工业、电子工业和宇航工业的需要，出现了很多难加工材料，这些材料在进行切削加工时，极易激起振动。另外，现代工业所需的精密零件对于加工精度和表面质量的要求越来越高。因此，在切削过程中哪怕出现极其微小的振动，也会导致被加工零件无法达到设计的质量要求。

高效、高速、强力切削和磨削加工是机械加工发展的一个重要方向，但是高速回转零件可能引起的强迫振动、大切削用量可能导致的自激振动，都是实现和推广这些加工方法的障碍。掌握振动的发生和变化的规律，探讨如何提高工艺系统的抗振性和消除振动的措施，使机械加工过程既能保证较高的生产率，又可以保证零件的加工精度和表面质量，是在机械加工方面应研究的一类重要课题。

机械加工过程中产生的振动，按其产生的原因分（与其他所有的机械振动一样），也分为自由振动、强迫振动和自激振动三大类。自由振动往往是由于切削力的突然变化或其他外界力的冲击等原因所引起的，这种振动一般可以迅速衰减，因此对机械加工过程的影响较小。而强迫振动和自激振动都是不能自然衰减而且危害较大的振动。据统计，在机械加工过程中，自由振动只占 5%左右，而强迫振动约占 30%，自激振动则占 65%，具体见表 5-6。

表 5-6 按工艺系统各种振动比例及原因

振动性质	比例	振 动 原 因
自由振动	9%	间隙、冲击力
强迫振动	64%	回转体不平衡、惯性力、轴系及齿轮振动
自激振动	27%	切削颤振、抖动、油膜涡流、润滑起泡等

1. 按工艺系统振动的性质分类（如图 5-34 所示）

在机械加工中，工艺系统的振动按产生的原因大致分为如下几类。

- (1) 自由振动：工艺系统受初始干扰力或原有外干扰力取消后产生的振动。
- (2) 强迫振动：工艺系统在外激振动力作用下产生的振动。

(3) 自激振动：工艺系统在加工过程中有反馈特性，获得能量补充而持续的振动，也称“颤振”。自激振动本来是自由振动的一种，这里把它分开，专门划分为一类，以便于后面的讨论。

2. 按工艺系统的自由度数量分类

- (1) 单自由度系统的振动：用一个独立坐标就能确定系统的振动。
- (2) 多自由度系统的振动：用多个独立坐标才能确定系统的振动。两个自由度振动系统是多自由振动系统的最简单形式。

5.5.2 机械加工中的强迫振动及其控制措施

强迫振动就是系统由外界持续激励所产生的振动。系统从外界不断地获得能量以补充阻尼所消耗的能量，使系统维持持续的等幅振动，此时系统的振动状态称为响应。

下面以单自由度系统的强迫振动为例，说明强迫振动的特性及抑制方法。

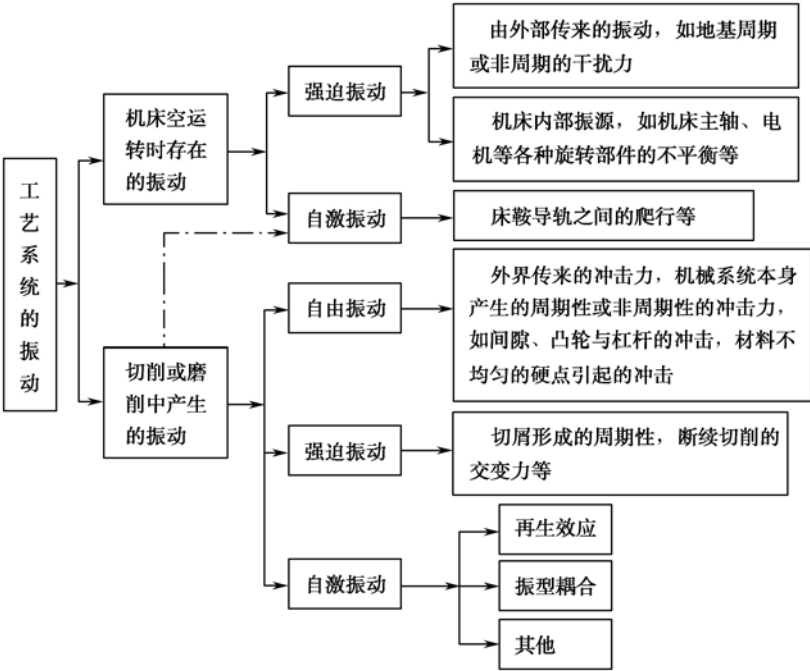


图 5-34 工艺系统振动的分类及产生振动的原因

1. 振动系统的简化

实际工艺系统是一个非常复杂的系统，要对其进行精确的数学描述是相当困难的。在分析工艺系统的振动问题时，往往需要把它简化成若干“无质量”的弹簧和“无弹性”的质量所组成的模型，这种简化模型称为质量弹簧系统。

一个振动系统的自由度是在振动过程中任何瞬时能完全确定系统在空间的几何位置所需的独立坐标数目。把一个系统简化成多少个自由度，这不仅取决于系统本身的结构特性，还取

决于研究振动问题的性质、要求的精度及振动的实际状况。例如，一台机床固定在混凝土基础上，如图 5-35 (a) 所示。当只研究机床与基础一起的整体运动时，由于实际状况的机床和基础整体的变形比地基土壤的变形小得多，且可以忽略不计，所以可把机床和基础的整体看做质量块 m ，如果把参与振动的土壤当做无质量的弹簧 k ，那么这个系统就可简化成弹簧质量系统。若考虑系统同时受到阻尼力的作用（其黏性阻尼系数为 c ）和激振力 F_d 的作用，并且只对质量块 m 的垂直方向振动感兴趣，那么就可以把实际的结构系统简化成单自由度强迫振动系统，如图 5-35 (b) 所示。

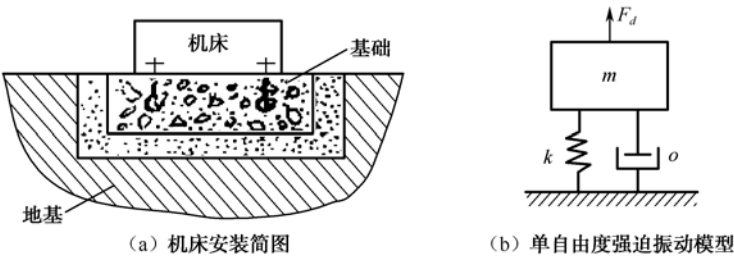


图 5-35 机床安装振动系统的简化模型

严格地讲，机床和基础的整体作为刚体该有 6 个自由度，但这里只研究垂直方向的振动，这样简化是合理的。

强迫振动的外界激振源的激振一般有两种形式：一种是激振源直接作用在质量块上，而且工艺系统多数情况是由回转体不平衡的离心惯性力引起的；另一种是支承运动的激励，如由地基传递来的位移激励。这里仅介绍前一种的强迫振动特性。

2. 激振力直接作用在质量块上的单自由度系统强迫振动

激振力直接作用在质量块上的单自由度系统强迫振动模型如图 5-36 (a) 所示。图中设质量块的质量为 m (kg)，弹簧刚度为 k (N/mm)，黏性阻尼系数为 c (N·s/mm)。激振力为简谐力 $F_d=F_0\sin\omega t$ ， F_0 为激振力幅 (N)， ω 为激振力的圆频率 (rad)， t 为时间 (s)。并设质量块处于静平衡位置时为坐标原点，取瞬时振动位移 x 向下为正。因此质量块任意瞬时的受力情况如图 5-36 (b) 所示。其中， W 为重力 (N)， x_{st} 为重力作用下的静位移 (mm)， F_d 为激振力， $k(x+x_{st})$ 为弹簧力， $c\dot{x}$ 为阻尼力， $m\ddot{x}$ 为惯性力，各力的受力方向如图示。则其微分方程为

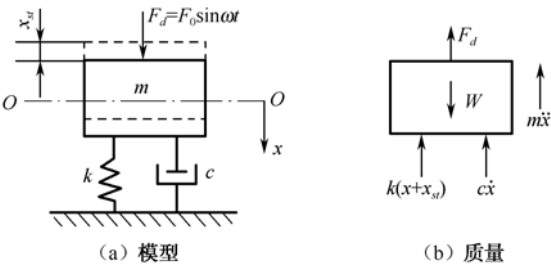


图 5-36 单自由度系统的强迫振动模型

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k(x + x_{st}) = F_0 \sin \omega t + W$$

因为 $kx_{st}=W$ ，于是上式可简化为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \tag{5-1}$$

引入符号 $2\delta = c/m$, $\omega^2 = k/m$, $q = F_0/m$
 式中, δ 为衰减系数; ω_0 为振动系统的固有圆频率。

于是式 (5-1) 可改写为

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = q \sin \omega t \quad (5-2)$$

现只考虑式 (5-2) 的特解, 它表示系统在简谐力作用下产生的强迫振动, 是持续的等幅振动, 称为稳态振动。现设特解为

$$x = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (5-3)$$

式中, A 为强迫振动的振幅 (mm); φ 为振动振幅与激振力的相位差。相位差表示振动时的位移变化与激振力的变化虽然同频率, 但它们不是同时到达最大值和零值, 如 $t=0$, $F_d=0$, 但位移 $x=-A \sin \varphi$, 且位移比力滞后。

式求 (5-3) 的一阶和二阶导数, 并将其综合求解, 得:

$$A = \frac{q}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}, \tan \varphi = \frac{2\delta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (5-4)$$

将式 (5-4) 代入式 (5-3) 得:

$$x = \frac{q}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (5-5)$$

式 (5-5) 就是简谐力作用下系统的位移响应。分析上述各式, 可得到强迫振动一些普遍性质的特点:

- (1) 在简谐力作用下, 强迫振动是简谐振动, 且振动频率与激振力的频率相同。
- (2) 强迫振动的振幅 A 和相位 φ 都取决于系统的物理性质、激振力的大小及其频率。
- (3) 强迫振动振幅的大小在工程应用上具有重要的意义。如果振幅超过允许限度, 就会使机器或构件产生过大的应力而导致破坏。为搞清楚影响强迫振动振幅的因素, 引入下列符号:

$$q = \frac{F_0}{m}, m = \frac{k}{\omega_0^2}, x_{st} = \frac{F_0}{k}, \lambda = \frac{\omega}{\omega_0}, D = \frac{\delta}{\omega_0}$$

式中, λ 为激振力圆频率与系统固有圆频率之比, 称为频率比; D 为衰减系数与系统固有圆频率之比, 称为相对阻尼比。

于是振动振幅的式 (5-4) 可改写为

$$\begin{aligned} A &= \frac{F_0}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} = \frac{F_0}{k} \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \frac{4\delta^2 \omega^2}{\omega_0^4}}} \\ &= x_{st} \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4D^2 \lambda^2}} = x_{st} \cdot V_1 (\text{mm}) \end{aligned} \quad (5-6)$$

式中, V_1 为系统的动态放大系数。

由式 (5-6) 可以看到影响振动振幅 A 的有三个因素:

- ① 静位移 x_{st} 的影响。它反映了激振力的影响, 相当于将激振力的最大力幅 F_0 静止作用在弹簧 k 上 ($x_{st}=F_0/k$) 所引起的静变形。说明强迫振动振幅 A 与激振力幅 F_0 成正比, 因此降低

振幅的方法就是按比例地改变激振力的幅值。

② 频率比 λ 的影响。它对振动的影响极大而且关系复杂, 可用振幅-频率响应曲线表示, 如图 5-37 所示。由式 (5-6) 可知, 其动态放大系数为

$$V_1 = \frac{A}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2D\lambda)^2}} \quad (5-7)$$

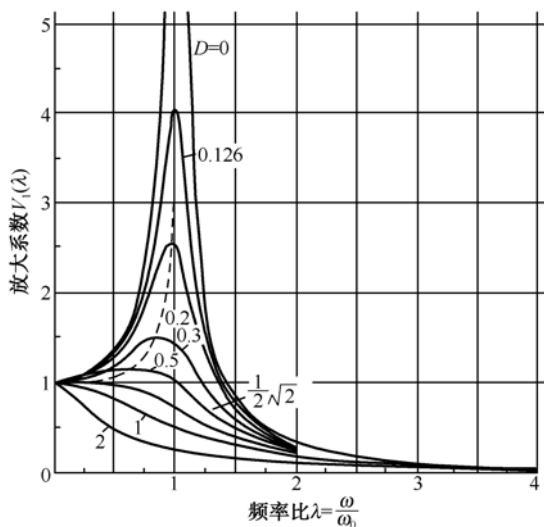


图 5-37 幅-频特性曲线

由图 5-37 可以看出:

$\lambda \rightarrow 0$ 时, V_1 趋近于 1, 这是激振力频率极低而近似等于静载荷, 系统接近于 F_0 所引起的静变形 x_{st} 。一般在 $\lambda < 0.7$ 以下的区域称为准静态区。

$\lambda \gg 1$ 时, V_1 趋近于零, 振幅非常小, 说明系统受激振力影响较小, 甚至不受影响。一般在 $\lambda > 1.4$ 以上的区域称为惯性区。

$\lambda = 1$ 附近, 振幅可以很大, 比 x_{st} 大很多倍。通常在阻尼较小时, 近似把激振力圆频率 ω 与系统固有圆频率 ω_0 相等时称为共振。因此把 $0.7 < \lambda < 1.4$ 这个区域称为共振区。理论上在阻尼比 $D=0$ 时, 振幅应无限大, 实际上系统总有阻尼存在, 共振振幅最大处并不在 $\omega = \omega_0$ 处, 而是在 ω 比 ω_0 略小处, 由图 5-51 可看到不同阻尼比 D 时共振峰值处随频率比变化的趋势。当阻尼比较小时 ($D \leq 0.707$ 时), 放大系数 V_1 有一个最大值 $V_{1\max}$ 。将式 (5-7) 对频率 λ 求导并使 $dV_1/d\lambda=0$, 则可求得共振时的频率比 $\lambda = \sqrt{1-2D^2}$, 将该值回带式 (5-7) 并忽略阻尼比的高次项得:

$$V_{1\max} = \frac{1}{2D\sqrt{1-D^2}} \approx \frac{1}{2D} \quad (5-8)$$

图 5-37 中虚线所示为不同 D 值时 $V_{1\max}$ 轨迹, 但实际应用中, 由于阻尼比 D 往往较小, 仍把 $\omega = \omega_0$ 时当做共振频率, 即共振频率 $\omega_n = \omega_0$, 若考虑阻尼的影响则共振频率 $\omega_n = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 。

③ 阻尼比 D 的影响。由振幅-频率特性曲线可看出在共振区增加阻尼对抑制振动有显著的效果。将式 (5-8) 带入式 (5-6) 得到最大振幅:

$$A_{\max} = x_{st} \cdot V_{1\max} = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{1}{2D} = \frac{F_0}{c\omega_0} \quad (5-9)$$

可见增大阻尼可抑制共振振幅，离开共振区越远，阻尼对减小振幅的作用越小。

(4) 由振幅-频率曲线确定振动系统阻尼。在工艺系统中由于阻尼很小，所以在振幅-频率曲线的频率比 $\lambda=1$ 附近的曲线可近似认为是对称的，如图 5-38 所示的虚线间的曲线。取 $V_1-\lambda$ 曲线上 $V_1=0.707/(2D)$ 两个点 a_1 、 a_2 ，称为半功率点。对应的激振频率为 ω_a 和 ω_b ，两者频率之差为 $\Delta\omega=\omega_b-\omega_a$ 。 $\Delta\omega$ 为系统的带宽，可由式 (5-7) 计算。通过求解，可得到相对阻尼比的计算公式为 $D=(\omega_b-\omega_a)/2\omega_0$ 。

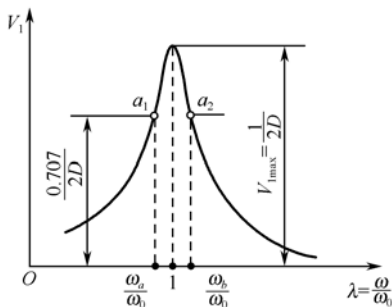


图 5-38 阻尼比的计算模型

(5) 强迫振动的振动位移与激振力频率相同，但有相位差 φ ，如图 5-39 所示。其相位差由式 (5-4) 计算：

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{2D\lambda}{1 - \lambda^2} \quad (5-10)$$

相位差 φ 与频率比 λ 的关系如图 5-40 中相-频特性曲线所示。当阻尼较小时，在 $\lambda \ll 1$ 的低频范围内，相位差 $\varphi=0$ ，即位移与激振力接近于同相位；在 $\lambda \gg 1$ 的高频范围内，相位差 $\varphi \approx \pi$ ，即在高频范围内位移与激振力反相位。在 $\lambda=1$ 时，即产生共振，其相位差 $\varphi=\pi/2$ 曲线反相，这时 φ 与阻尼无关，这是共振时的一个重要特征。因此，可根据激振响应的相位是否反相来判断共振频率。

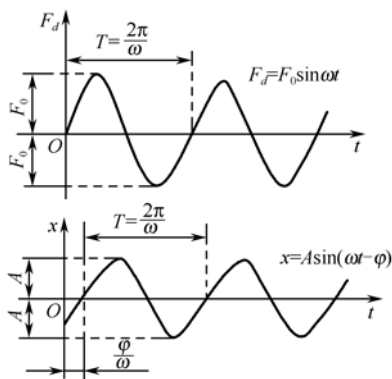


图 5-39 力与振动位移的相位差

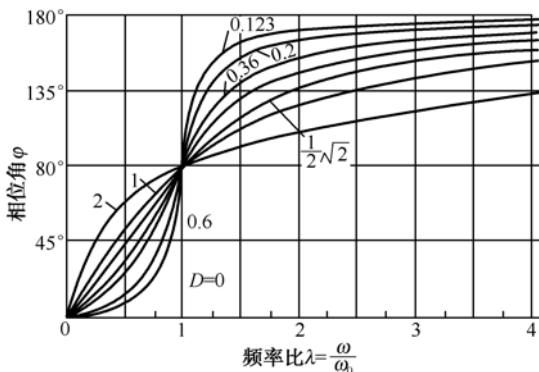


图 5-40 相-频特性曲线

(6) 强迫振动的频率响应轨迹。将幅-频和相-频曲线组合在一起可用复平面表示振动位移、相位及频率比之间在各种不同阻尼情况下的轨迹 G_m ，就称为频率响应轨迹。如图 5-41 所示。

取 $D=0.05$ ，不同的 D 值有不同的相似轨迹。图 5-41 (a) 中，当频率比为 λ_1 时，放大系数为 V_1 。由图 5-41 (b) 所示可知频率比 λ_1 时的相位差为 φ_1 。在图 5-41 (c) 中，频率响应轨迹上用矢量 OA 长短表示 V_1 大小，以 OA 与实轴 R_a 的夹角 φ_1 表示在该频率比 λ_1 下位移滞后于力的相位差。随着频率比 $\lambda=\omega/\omega_0$ 的变化，矢量 OA 的端点 A 的不断变化所形成的轨迹就是频率响应轨迹 G_m 。频率以刻度方式表示，于是就一目了然地看出 V_1 、 φ 及 λ 三者的关系。

3. 振动系统的动态刚度与动态柔度

在前述章节中讨论的工艺系统受力变形中，得到了系统在静态力作用下产生静位移的规律。当系统在周期性动载荷作用下，交变力的幅值与振幅（动态位移）之比，由本章的推导可知，它与所受动载荷的交变频率有很密切的关系，因而通常把系统在某频率下产生的振幅与所需的激振力幅之比，定义为系统的动态刚度。将动态刚度表示为

$$k_d = F_0 / A = m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2} = k\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4D^2\lambda^2}$$

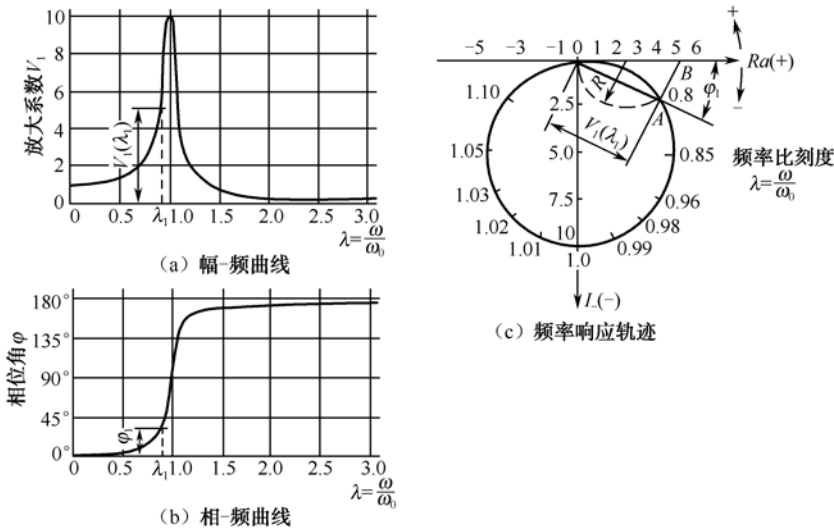


图 5-41 频率响应轨迹与幅-频、相-频曲线的关系

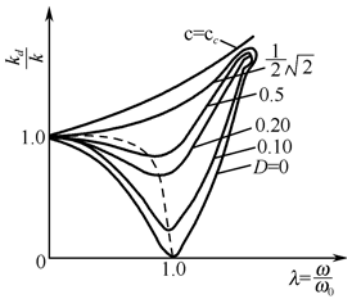


图 5-42 动静态刚度比与频率比的关系

- 动态刚度 k_d 的倒数即为动态柔度 G ，即 $G=1/k_d$ 。由上式和图 5-42 所示可知：
- (1) 当激振频率 $\omega=0$ 时，动载荷转化为静载荷，故 $k_d=k$ ，即以静态刚度产生静位移。
 - (2) 当 $\omega \approx \omega_0$ ，即发生共振时， k_d 就出现最小值，即动态柔度 G 为最大。

(3) 在相同的频率比的条件下, 系统随着衰减系数 δ 的增大或系统阻尼比 D 的增大而使系统的动态刚度 k_d 增大。

(4) 随着 δ 和 D 的增大, k_d 有不断增大的趋势; 当 $\delta=0$, 产生共振时的 $k_d=0$, 动态柔度 $G=\infty$ 。

显然, 系统的动态刚度越大(即动态柔度越小), 或系统的阻尼比越大, 就意味着要产生一定的振幅(或动态位移)所需要的交变干扰力就越大, 因而就称该系统的抗振性能好。因此, 增大机床结构或工艺系统的动态刚度和阻尼比, 就是提高机床或工艺系统的动态特性、保证加工质量的有效措施。

4. 减小强迫振动的基本途径

根据强迫振动的产生原因、运动规律及特性, 来寻求控制的途径。一般首先通过测振试验和频谱分析, 从而在工艺系统内部或外界寻找相同频率(或整倍数的频率)振源来确定干扰振源; 然后根据不同的干扰振源采用不同的措施予以控制。

(1) 消除工艺系统中回转零件的不平衡。回转零件不平衡会形成一个周期性的干扰振源, 其干扰圆频率就是回转零件的角速度 $\omega=2\pi n/60$ (rad/s)。干扰力就是不平衡质量 m 引起的离心力, 对于这种干扰振源, 控制它的主要方法是对不平衡部件进行动平衡和静平衡。例如在外圆磨削时, 特别是在精密、高速磨削时, 砂轮主轴部件的平衡就更为重要, 而在整个主轴部件中, 砂轮质量占的比重较大, 所以砂轮不平衡最易引起振动。在砂轮制造中, 一般难以保证密度的均匀性, 从而引起其质量偏心; 在砂轮使用时, 砂轮表面磨损不均匀、冷却液吸附的差异性等, 都会引起砂轮附加不平衡而激起砂轮主轴的强迫振动。所以, 新装砂轮应进行两次平衡, 即在粗修整前、后要进行两次静平衡, 然后精修砂轮。但这种平衡精度低, 且平衡精度保持性较差, 效率低。为适应高速、高效、高精度磨削发展的要求, 应采用附加平衡装置的办法进行砂轮在线自动平衡。

(2) 提高机床传动件的制造精度。齿轮啮合振动往往带来噪声。减小啮合振动的途径主要是提高齿轮的制造精度和装配质量, 采用对振动冲击不敏感的材料。滚动轴承的振动一方面会引起噪声, 另一方面作为主轴轴承的滚动轴承振动还将引起主轴系统的振动, 严重影响加工精度及表面质量。其振动频率也是特定的, 可以通过计算确定。

(3) 减振与隔振。为防止液压驱动引起的振动, 最好将油泵与机床分离开, 并用软管连接。在精密磨床上最好将齿轮泵改用叶片泵或螺旋泵。由往复运动产生惯性力引起的振动, 一般采用液压缓冲结构或装置来设法减少工作台换向时的冲击。

工艺系统的干扰振源, 除来自机床以外, 还可以来自工件和刀具。做回转运动的工件本身不平衡、加工表面不连续、加工余量或工件材质不均匀, 都会引起切削力周期性的变动; 在刀具做回转运动的场合, 如铣削时, 由于刀齿的不连续切削会引起周期性的切削冲击振动。对于减小这类干扰振动的措施, 一般是采用减振装置。对于由地基传来的干扰振源, 主要是采用隔振措施。

(4) 合理设计固有频率, 避开共振区。根据强迫振动的特性, 在结构设计中重点考虑工艺系统各部件的固有频率应该远离干扰振源的频率, 也就是避开共振区, 使工艺系统各部件在准静态区或惯性区运行, 以免共振。

(5) 提高工艺系统的刚性及增加阻尼。采取这样的措施后可以减小系统的振动, 提高系统的抗振能力。关于提高工艺系统刚性的措施, 请参见本书第4章的相关内容。

5.5.3 机械加工中的自激振动及其控制措施

在机械加工中,经常遇到另一类强烈的振动,它不是周期性的外干扰力或者断续切削(如铣削)所引起的强迫振动。在金属切削过程中,一种情况是在某些条件下,刀具碰到材料的硬点,使静态切削力 F_0 增加了一个动态力 F_d 的效应,静态力由工艺系统的结构变形所吸收,切削力的突然增加使工艺系统进一步产生变形,因为变形使系统储存的位能要释放,从而使系统发生振动。因为工艺系统是由若干个弹性环节组成的,所以切削过程产生的这种振动又引起工件与刀具之间相对位移的变化,这样不断循环下去。但是,当系统耗散的能量大于由动态干扰力激起振动向系统输入的能量时,此时已激发起来的振动逐渐衰减,使切削过程处于稳定(即不产生振动)。可是当工艺系统耗散的能量小于输入的能量时,振动不但不衰减,反而继续增大。但因为系统的非线性作用,此振动不会无限地增大,而是维持在某一振幅下振动,此时系统耗散的能量与输入的能量达到平衡状态。一旦停止切削,振动也就消失。这是此类振动的一个很重要的特点。

另一种情况的振动现象也是在切削过程中,当切削宽度(或切深)较小时,加工过程不产生振动,系统是稳定的。当切削宽度(或切深)增加到一定程度时,加工过程就开始发生振动,系统处于不稳定的状态,从而发生强烈的振动。系统在稳定和不稳定之间有明显的界限。一般对于任何加工过程,只要充分增加切削宽度(或切深)总能使加工过程处于不稳定状态。同样,切削停止,振动即衰减直至消失。

这两种情况的振动都是切削过程本身引起的,是切削过程产生剧烈振动的主要现象。这是切削过程本身某种原因使切削力产生周期性的变化,并由这个周期性变化的动态力反过来对系统做功(输入能量)来补偿系统由于阻尼作用所耗散的能量,以加强和维持这种振动。这种类型的振动就叫自激振动。在金属切削过程中的自激振动一般称为切削颤振,简称为颤振。

1. 金属切削过程的自激振动

金属切削过程的自激振动原理用图 5-43 所示。它是一个闭环系统,包括切削过程(1)和工艺系统(2)两个基本部分以及这两部分之间的方位联系(3)。在加工过程中,刀具与工件之间的振动 Y 使切削过程的静态力叠加了动态切削力 F_d ,而 F_d 又作用在工艺系统上,再使工艺系统产生振动 Y ,并且两个基本部分之间由方位来联结。这是因为加工表面在空间有确定的位置,动态切削力 F_d 有确定的方向,而且工艺系统的振动在空间上也有确定的方向,即工艺系统的各阶振型在空间有确定的振动方向。若改变两个基本部分之间的相互方位就可以改变它们之间的相互影响程度,即改变了加工过程稳定性极限的条件。因此,可认为有三组参数影响自激振动的发生,即切削过程、工艺系统及它们之间的相互方位联系。

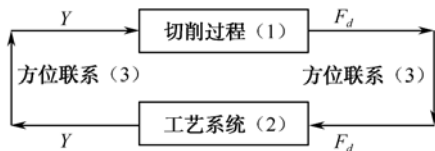


图 5-43 金属切削自激振动系统

目前机械加工自激振动原理主要有“再生颤振原理”、“振型耦合颤振原理”等解释。

2. 再生颤振原理

颤振理论的研究成果之一就是“再生效应”来解释机械加工过程产生的颤振现象。在解释“再生颤振”机理前,先来说明动态切削力的产生过程。例如车床径向切入加工,如图 5-44 (a) 所示,若切削过程受到一个瞬时的偶然干扰,如图 5-44 (b) 所示,使工件与刀具间产生相对振动(自由振动),由于这一干扰随即消失,系统振动逐渐衰减,但在工件表面留下一段波纹,如图 5-44 (c) 所示。当后一转切削时,刀具在有波纹的表面切削,由于切削厚度的变化,使切削力发生波动,就在静态力 F_0 上叠加了动态力 F_d ,如图 5-44 (d) 所示。这就是动态力产生的过程。

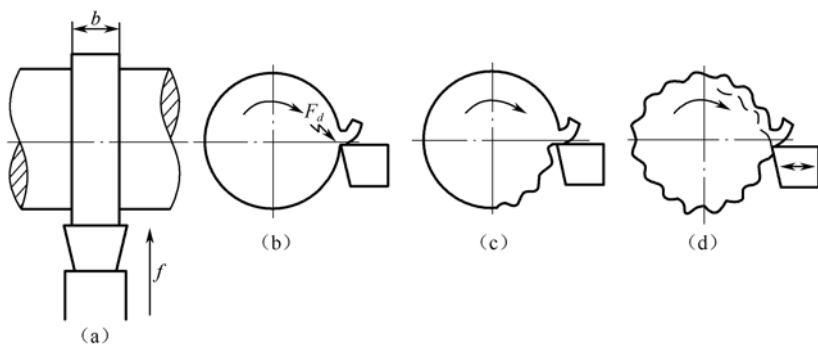


图 5-44 再生颤振动态力的形成过程

实际加工中,刀具总是在前一转(车削)或前一次行程(刨削)或前一刀齿(铣削)中,在已加工过的表面上做后继切削,平均切削厚度为 a_m ,如图 5-45 所示。假设在第 j 次切削时,由于某种原因使刀具与工件间产生相对振动,使加工表面成为波纹状,那么第 $j+1$ 次切削就在已有波纹的表面上进行。由于前一次波纹 Y_a 产生了动态切削力 F_d , F_d 又激起工艺系统的振动,使刀具与工件之间产生相对振动 Y_b , 振动 Y_b 又一次在工件表面产生波纹,这种波纹又在后继切削中重复再生,就称为“再生效应”。

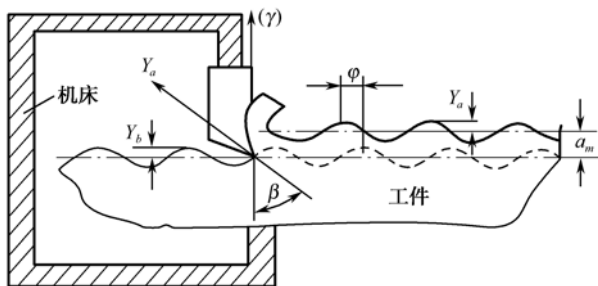


图 5-45 再生颤振原理

若切削过程与工艺系统的各种组合条件(如振动频率 ω 与前后两次波纹的相位差 φ 的组合等)使输入系统的能量足以补偿系统由于阻尼所耗散的能量,就会促进系统发展成为动力不稳定的持续颤振状态,这种由再生效应引起的颤振就叫做“再生颤振”。当然如果各种条件的组合是抑制振动的发展,那么振动就逐渐衰减,以至最后恢复稳定的切削状态。

分析颤振这个闭环系统的动态特性,可从切削过程与工艺系统两个基本部分入手,并把两者组合在一起进行稳定性分析。

1) 动态切削力 F_d

该理论基于如下假设成立:

(1) 因为工艺系统振动使刀具与工件之间发生相对振动, 只考虑刀具径向进给方向的振动分量对切削力有显著的影响, 虽然垂直于进给方向的分量会使切削速度发生变化, 和速度有关的力可看成是阻尼力, 但假设它对切削力无影响。

(2) 假定在一定的进给条件下, 切削力仅仅是由切削厚度的变化所引起的, 与切削厚度的变化成正比, 而且两者没有相位差, 即同时发生。

(3) 切削厚度的变化引起的动态切削力与静态切削力的方向一致。

(4) 假定工艺系统是一个单自由度系统, 且作用在系统上的动态切削力 F_d 为简谐力。

再生颤振时, 动态切削力与切削厚度的变化的关系如图 5-46 所示, 该图表示车削一段圆弧的展开图。若前一次切削因振动残留在加工面 (Y) 向的波纹为 Y_a , 后一次切削残留在加工面的波纹为 Y_b , 由两者之差可求出切削厚度的变化量 u , 切削力的变动就与 u 成正比。图中的 φ 是前后两次波纹的相位差, 即后一次波纹滞后于前一次波纹。根据假设条件, 可求出刀具与工件之间的相对振动位移 Y_a 和 Y_b 的方程为

$$Y_a = |Y| \cos(\omega t + \varphi)$$

$$Y_b = |Y| \cos \omega t$$

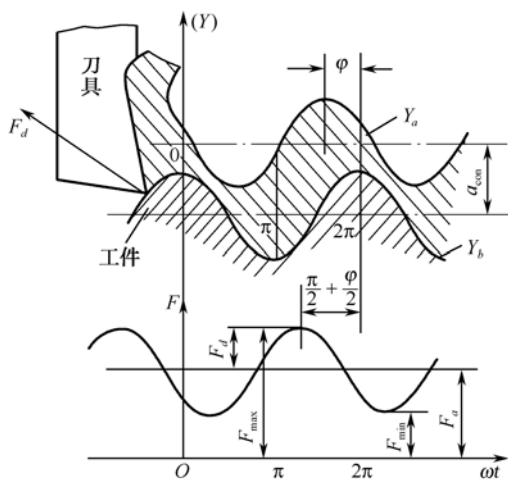


图 5-46 再生颤振下切削厚度变化与动态力的关系

式中, $|Y|$ 为刀具的振动振幅。于是切削厚度随时间的变化量为

$$\begin{aligned} u(t) &= Y_a - Y_b = |Y| [\cos \omega t (\cos \varphi - 1) - \sin \omega t \sin \varphi] \\ &= -|Y| \cdot 2 \sin \frac{\varphi}{2} \left(\sin \omega t \cos \frac{\varphi}{2} + \cos \omega t \sin \frac{\varphi}{2} \right) \\ &= 2|Y| \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left[\omega t + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] (\text{mm}) \end{aligned} \quad (5-11)$$

由于切削厚度的变化而产生的动态力 F_d 为

$$F_d = C_d a_\omega u(t) \quad (\text{N}) \quad (5-12)$$

式中, C_d 为动态切削力系数 (N/mm^2); a_ω 为切削宽度 (mm)。

在此假设和稳定切削时一样,切削力与切削截面成正比,则 C_d 就是比例系数。将式 (5-11) 代入式 (5-12) 得:

$$F_d = 2C_d a_w |Y| \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left[\omega t + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] = |F_d| \cos \left[\omega t + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (5-13)$$

式中, $|F_d| = 2C_d a_w |Y| \sin \frac{\varphi}{2}$, 为动态切削力 F_d 的力幅。

动态力 F_d 的重要特征在于它不仅和扰动的位移有关,而且和它的速度有关。和速度有关的力可看成阻尼力,所以它们可叠加在系统所包含的阻尼力上,如果由 F_d 引起的阻尼为正,则它将使结构系统原来存在的阻尼(如结构阻尼、连接面的摩擦等)增加,其结果是使扰动迅速衰减。另外,如果由 F_d 所引起的阻尼力为负,它会使系统的阻尼减小,甚至可超过系统的阻尼使全部阻尼为负。正阻尼吸收系统的能量,而负阻尼则意味着向系统输入能量,用于产生和维持振动。

2) 切削过程的动态柔度(传递函数)

式 (5-13) 表示:根据与瞬时切削厚度的变化量 u 成正比的假设,求出的动态力 F_d 具有和刀具与工件之间相对振动位移相同的频率 ω ,并且按余弦波形状的形式变化。而且动态力 F_d 的力幅 $|F_d|$ 是刀具振动振幅 $|Y|$ 的 $2C_d a_w \sin(\varphi/2)$ 倍。若切削过程的动态柔度(或传递函数)用 $|G_c|$ 表示,则

$$|G_c| = \frac{|Y|}{|F_d|} = \frac{1}{2C_d a_w \sin(\varphi/2)} \quad (\text{mm/N}) \quad (5-14)$$

切削过程的动态柔度 G_c 不仅与 C_d 、 a_w 与有关,还与 φ 有关。位移与动态力的相位差为

$$\varphi_c = \angle(|Y|/|F_d|) = -(\varphi + \pi)/2 \quad (5-15)$$

式中,负号表示位移 Y 滞后于动态力 F_d ,即图 5-46 中 F_d 比 Y 超前一个相位角 $(\pi + \varphi)/2$ 。

3. 振型耦合颤振原理

前述的再生自激振动机理主要是针对单一自由度振动系统而言的。实际的振动系统一般都是多自由度振动系统。振型耦合学说是在排除再生自激振动的条件下对切削过程的自激振动现象进行解释的学说,主要用于多自由度系统的自激振动现象。

如图 5-47 所示,质量为 m 的刀具悬挂在两个刚度为 k_1 和 k_2 ($k_1 < k_2$) 的弹簧上,加工表面的法向 (y) 与振型方位 (x_1) 和 (x_2) 的夹角分别为 α_1 和 α_2 ,动态切削力 F_d 和 y 方向的夹角为 β_0 。 F_d 以同一频率同时激起两个振型 x_1 和 x_2 的振动,因为 k_1 不等于 k_2 ,它们的合成运动在 (x_1, x_2) 平面内的轨迹即为椭圆。假定刀尖的运动按图中箭头方向,当刀尖沿由 A 到 B 的轨迹切入工件时,运动方向与切削力方向相反,刀具做负功;刀尖沿由 B 到 A 的轨迹切出时,运动方向与切削力方向相同,刀具做正功。由于切出时的平均切削厚度大于切入时的平均切削厚度,在一个振动周期内,切削力所做的正功大于负功,所以有多余的能量输入振动系统,振动得以维持。如果刀具和工件的相对运动轨迹沿着和图中箭头相反的方向切入和切出,切削力做的负功大于正功,振动就不能维持,原有的振动就会不断地衰减下去。

实验表明,当小刚度方向 x_1 落在 β 角内时,即 $\alpha_1 < \beta$ 为不稳定区。其中当 $\alpha_1 = \beta/2$ 时,稳定性最差,最容易发生颤振。

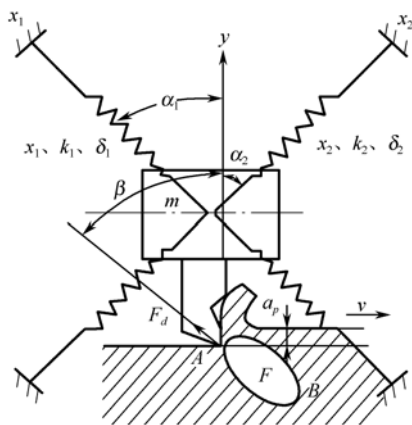


图 5-47 振型耦合原理

5.5.4 机械加工中振动的诊断技术

生产中出现的切削振动究竟是属于受迫振动还是自激振动？如果是自激振动，那还要明确是再生型还是耦合型或摩擦型，这些都需要通过诊断来判别。所以在具体介绍切削振动的防治之前，有必要明确切削振动的诊断问题。

1. 受迫振动的诊断方法

受迫振动有以下特征：

- (1) 受迫振动的频率与激振力的频率相等或是它的整数倍；
- (2) 受迫振动是在与切削过程无关的一些外部激振力的持续作用下，系统受迫产生的振动。激振力一旦消除，受迫振动就会立即停止。

判断机械加工中发生的振动是受迫振动还是自激振动的诊断流程如下：

- (1) 停止切削，进行机床空运转试验（机床运动参数与切削时完全相同），设法拾取振动信号并进行频谱分析，画频谱图，若频谱图上有峰值，则证明机床加工中有受迫振动成分。
- (2) 设法拾取加工过程中的振动信号，然后对振动信号进行频谱分析，画频谱图。
- (3) 分析比较机床空运转试验和切削加工所得到的频谱图。如果两者的谱线成分完全相同，只是峰值大小有所不同，则可判断切削加工中产生的振动是受迫振动；如果切削加工的谱线图上有与机床空运转试验的谱线成分（或是它的整数倍）不同的频率成分，则可判断切削加工中除有受迫振动外，还有自激振动。

诊断受迫振动振源的步骤，可按如下流程进行：

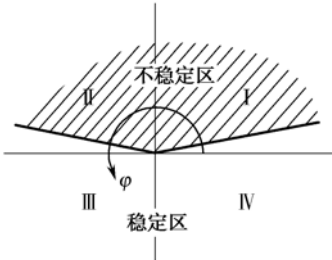
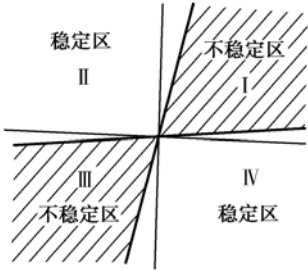
- (1) 在停机状态下做环境试验。对所测振动信号进行频谱分析，可以判断在受迫振动频率成分中，是否有周围环境的干扰振源。
- (2) 根据各运动部件的运动参数计算各运动部件的干扰力频率，并与机床空运转试验谱线图做比较，如果有与谱线图上的频率成分相同的成分，则与此频率成分相对应的运动部件可能就是受迫振动的振源。受迫振源也许有好个，重要的是尽力寻找振幅最大的那个振源。
- (3) 开停一切可能成为振源的部件，对所测振动信号进行频谱分析。改变一切有可能成为

振源部件的运动参数，对所测信号进行频谱分析，最终确定受迫振源。

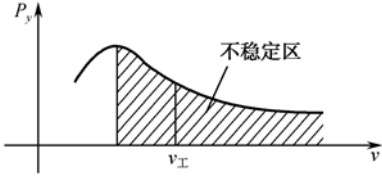
2. 自激振动的诊断方法

在确认切削加工中有自激振动后，尚需诊断自激振动的类型。因为不同类型的自激振动（颤振）都有其各自的激振机理，若颤振的类型判断错了，自然也就不能对症下药，采取措施消振防振。自激振动的诊断方法参见表 5-7。表 5-7 所列的颤振诊断表，因涉及振动测试、数据处理等诸多问题，在此不再一一解释，感兴趣的同学，可查阅相关文献。

表 5-7 颤振类别诊断表

颤振类型	诊断参数	测试、计算	诊断要领
再生型颤振	前后两转切削振纹的相位差 φ	<p>① 测量工件的转速 n (r/min)，测量精度 0.01r/min</p> <p>② 测量颤振频率 f，测量精度 0.02Hz</p> <p>③ 计算加工表面振痕数目</p> $J=60f/n=J_{\text{整}}+J_{\text{尾}}$ <p>④ 计算相位差φ</p> $\varphi=360^{\circ}(1-J_{\text{尾}})$	 <p>若 $0^{\circ} < \varphi < 180^{\circ}$，可判断切削加工可能有再生型颤振发生</p> <p>若 $180^{\circ} < \varphi < 360^{\circ}$，可判断切削加工中发生的颤振不是再生型颤振</p>
	振痕分布的旋向（副切削刃不参与二次切削的情况下）	目测	<p>若振痕分布为右旋，可判断切削加工中可能有再生型颤振产生</p> <p>若振痕分布为左旋，可判断切削加工中的颤振不是再生型颤振</p>
振型耦合型颤振	各向振动位移的相位差 φ	<p>① 测量 y 向振动位移和 z 向振动位移，通常它们都是混频信号</p> <p>② 求所测 y、z 两混频信号的互谱密度函数 $S_{yz}(f)$，测 $S_{yz}(f)$ 在颤振频率成分上的相位差$\varphi_{yz}(f)$</p> <p>③ 求被测信号 $y(t)$ 与 $z(t)$ 的凝聚函数 $r_{yz}(f)$，以检查信号的相关程度。若 $r_{yz}(f) \geq 0.7$，则可认为 $y(t)$ 与 $z(t)$ 是大体相关的，所测相位差$\varphi_{yz}(f)$ 是可信的</p>	 <p>若φ位于第 I 或第 III 象限的阴影区，则可判断切削加工中有振型耦合型颤振</p> <p>若φ位于第 II 或第 IV 象限：则可判断切削加工中没有振型耦合型颤振发生</p>

续表

颤振类型	诊断参数	测试、计算	诊断要领
摩擦型颤振	切削力随切削速度变化的特性	在加工条件下(除切削速度外,其他条件均与实际加工相同),改变切削速度 v , 测量切削力 P , 作 P_y-v 曲线	<div></div> <p>若工作速度 $v_{工}$ 落在 P_y-v 曲线的下降特性区(阴影区), 则可判断切削加工中有摩擦型颤振</p> <p>若工作速度 $v_{工}$ 落在 P_y-v 曲线的上升特性区, 则可判断切削加工中发生的颤振不是摩擦型颤振</p>

5.5.5 机械加工振动的防治

消除或减小机械振动的途径有三种：消除或减弱产生振动的条件；改善工艺系统的动态特性；采用消振减振装置。

1. 消除或减弱产生振动的条件

1) 消除或减弱产生强迫振动的条件

(1) 消除或减小内部振源。机床和其他机械的振动大多数是由于回转零件的不平衡引起的，因此对于机床上的高速回转零件，必须进行动平衡；同时，也可以通过提高传动元件及传动装置的制造精度和装配精度，或使动力源与机床本体分离等来保证传动平稳，从而消除或减小强迫振动。

(2) 调整振源的频率。通过改变传动比，使可能引起强迫振动的振源频率远离机床加工系统薄弱环节的固有频率，避免产生共振。

(3) 消振与隔振。消除强迫振动最有效的办法是找出外界的干扰力并去除，若不能去除，可使振源产生的部分振动被隔振装置隔离或吸收。隔振方法有两种：一种是主动隔振，阻止机内振源通过地基外传；另一种是被动隔振，阻止机外干扰力通过地基传给机床。常用的隔振材料有橡皮、金属弹簧、空气弹簧、矿渣棉、木屑等。

2) 消除或减弱产生自激振动的条件

(1) 减小重叠系数。再生型颤振是由于在有波纹的表面上进行切削引起的，如果本转(次)切削不与前转(次)切削振纹相重叠，就不会有再生型颤振发生。重叠系数越小，就越不容易产生再生型颤振。重叠系数值大小取决于加工方式、刀具的几何形状及切削用量等。适当增大刀具的主偏角和进给量，均可使重叠系数减小。

(2) 减小切削刚度。减小切削刚度可以减小切削力，可以降低切削厚度变化效应(再生效应)和振型耦合效应的作用。改善工件材料的可加工性、增大前角、增大主偏角和适当提高进给量等，均可使切削刚度下降。

(3) 合理布置振动系统小刚度主轴的位置。

2. 改善工艺系统的动态特性

1) 提高工艺系统刚度

提高工艺系统薄弱环节的刚度,可以有效地提高机床加工系统的稳定性,如提高各结合面的接触刚度、对主轴支承施加预载荷、对刚性较差的工件增加辅助支承等。

2) 增大工艺系统的阻尼

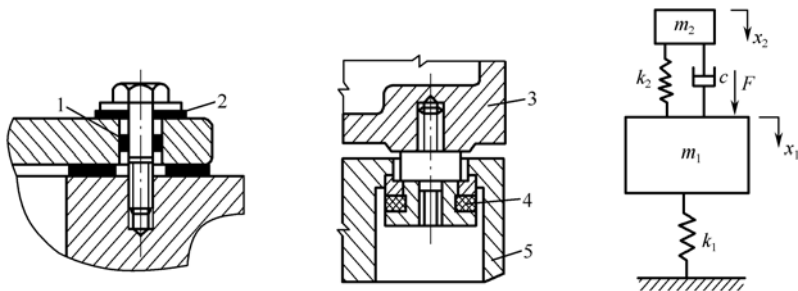
增大工艺系统中的阻尼,可通过多种方法实现。例如,使用高内阻材料制造零件,增加运动件的相对摩擦,在床身、立柱的封闭内腔中充填型砂,在主振方向安装阻振器等。

3. 采用减振装置

常用的减振装置有动力式减振器、摩擦式减振器和冲击式减振器。

1) 动力式减振器

如图 5-48 所示为动力式减振器。它是利用附加质量的动力作用,使弹性元件附加给振动系统上的力与系统的激振力尽量抵消,以此来消耗振动能量。

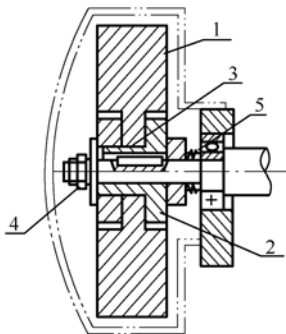


1—橡皮圈; 2—橡皮垫; 3—质量 m_1 ; 4—弹簧阻尼元件; 5—附加质量 m_2

图 5-48 动力式减振器

2) 摩擦式减振器

它是利用摩擦阻尼来消耗振动能量,达到减振的目的。如图 5-49 所示为安装在滚齿机上的固体摩擦式减振器。它是靠飞轮 1 与摩擦盘 2 之间的摩擦垫 3 来消耗振动能量的。



1—飞轮; 2—摩擦盘; 3—摩擦垫; 4—螺母; 5—弹簧

图 5-49 摩擦式减振器

3) 冲击式减振器

如图 5-50 所示为冲击式减振镗刀与减振镗杆。冲击式减振器是由一个与振动系统刚性连接的壳体和一個在体内自由冲击的质量块组成的。当系统振动时，由于自由质量块反复冲击壳体而消耗了振动能量，故可显著衰减振动。

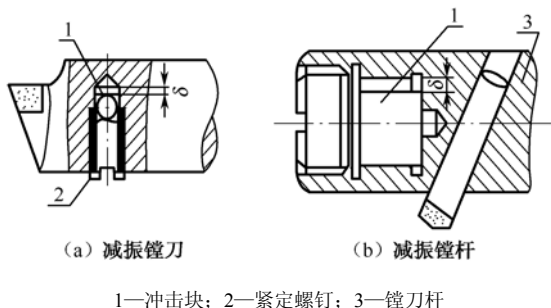


图 5-50 冲击式减振镗刀与减振镗杆

习题 5

5-1. 机器零件的表面质量包括哪几方面内容？为什么说零件的表面质量与加工精度对保证机器的工作性能来说具有同等重要的意义？

5-2. 影响切削表面粗糙度的因素有哪些？试讨论如何解释下列生产实践问题：

(1) 拉削 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的花键拉刀，前角从 10° 增大到 22° ，加工表面粗糙度从 $Ra=6.3\mu\text{m}$ 降低到 $Ra=0.8\mu\text{m}$ 。

(2) 一批零件的内孔先采用大行程量进行扩孔，然后按直径大小分成两组进行铰孔。铰削余量小的一组零件铰后，表面粗糙度较余量大的一组低 $1\mu\text{m}$ 左右。

(3) 两批 45 号钢工件，热处理后硬度各为 HB190、HB228。当切削速度为 0.833m/s 时，加工后材料硬度高者表面粗糙度 $R_z=7.5\mu\text{m}$ ，硬度低者 $R_z=15\mu\text{m}$ 。当切削速度提高到 3.33m/s 时，两者表面粗糙度均达到 $R_z=5\mu\text{m}$ 。

(4) 加工 1Cr18Ni9Ti 时，不带修光刃端铣刀加工表面粗糙度为 $Ra=3.2\mu\text{m}$ ，带修光刃的端铣刀加工表面粗糙度为 $Ra=0.8\mu\text{m}$ 。

5-3. 什么是冷作硬化现象？实验表明：切削速度增大，硬化现象减小；进给量 f 增大，硬化现象增大；刀具刃口圆弧半径 r_ϵ 增大，后刀面磨损 VB 增大，硬化现象增大；前角 γ_0 增大，硬化现象减小。在同样切削条件下，切削 10 号钢硬化深度 h 与硬化程度 N 均比车削 T12A 的大，而铜件比钢件小 30%，铝件比钢件小 70%。如何解释上述各实验结果？

5-4. 什么是磨削“烧伤”？为什么磨削加工会发生“烧伤”？为什么磨削高合金钢比普通碳钢更容易产生“烧伤”？磨削外圆时，为什么相应提高工件和砂轮的线速度，不仅可以避免“烧伤”提高生产率，而且又不会增大表面粗糙度？解决“烧伤”问题的基本途径与措施有哪些？

5-5. 为什么在机械加工时，工件表面会产生残余应力？磨削加工工件表面层中残余应力产生的原因与切削加工是否相同？为什么？

5-6. 什么是强迫振动？它与自由振动有什么区别？减小强迫振动的基本途径有哪些？

5-7. 什么是自激振动？它与强迫振动有何区别？目前关于自激振动的学说有哪些？其要点是什么？通过哪些措施可以抑制自激振动？

5-8. 在安装在防振地基上的车床或外圆磨床上，车削或磨削一根刚度较大的轴时，发现工件加工表面上有振纹。如何判断振动是由强迫振动引起的还是由自激振动引起的？如果是由强迫振动引起的，如何判断振源在哪里？

第6章

提高劳动生产率和技术经济性分析

6.1 提高劳动生产率的工艺措施

6.1.1 劳动生产率的基本含义

劳动生产率是衡量生产率的一个综合性指标。它表示一个工人在单位时间内为社会创造财富的价值。

劳动生产率是指单位人时的平均生产量，也就是指一个工人在单位劳动时间内制造出的合格产品的数目。它也可以用完成某一工作所必需的劳动时间来衡量。完成零件一个工序的必需的时间称为时间定额。

时间定额不仅是衡量劳动生产率高低的依据，同时也是工人安排生产计划、核算成本的重要依据。所以，在工艺规程中一般都要制订时间定额。

完成一个零件的一个工序的时间定额，称为单件时间定额。它包括下列组成部分。

(1) 基本时间 ($T_{\text{基本}}$): 直接改变生产对象的形状、尺寸、相对位置与表面质量等所耗费的时间。对机械加工而言，是指切除金属所耗费的时间（包括刀具的切入和切出时间），又称机动时间。

(2) 辅助时间 ($T_{\text{辅助}}$): 为实现工艺过程所必须进行的各种辅助动作所消耗的时间。其中包括装卸零件、试切和测量零件尺寸等辅助动作所费时间。

基本时间和辅助时间的总和称为操作时间 ($T_{\text{操作}}$)。

(3) 布置工作地时间 ($T_{\text{布置}}$): 为使加工正常进行, 工人照管工作地 (如更换刀具、润滑机床、清理切屑、收拾工具等) 所消耗的时间。通常按照作业时间的 2%~7% 估算。

(4) 休息和生理需要时时间 ($T_{\text{休息}}$): 工人在工作班内为恢复体力和满足生理上的需要所消耗的时间。一般按作业时间的 2% 估算。

上述时间的总和为单件时间, 即

$$T_{\text{单件}} = T_{\text{基本}} + T_{\text{辅助}} + T_{\text{布置}} + T_{\text{休息}}$$

在成批生产中, 还需考虑准备与终结时间。

(5) 准备与终结时间 ($T_{\text{准终}}$): 工人为了生产一批产品或零部件, 进行准备和结束工作所消耗的时间。准备工作有熟悉工艺文件、领料、领取工艺装备、调整机床等。结束工作有拆卸和归还工艺装备、送交成品等。因为该时间对于一批零件 (批量为 N) 只消耗一次, 故分摊到每个零件上的时间为 $T_{\text{准终}}/N$ 。

所以, 批量生产时单件时间定额为上述时间之和, 即

$$T_{\text{单件}} = T_{\text{基本}} + T_{\text{辅助}} + T_{\text{布置}} + T_{\text{休息}} + T_{\text{准终}}/N$$

在大量生产时, 每个工作地点完成固定的一道的工序, 一般不需要考虑准备终结时间。如果要计算, 则因为 N 值很大, $T_{\text{准终}}/N \approx 0$, 也可忽略不计。所以, 其单件时间定额为

$$T_{\text{定额}} = T_{\text{单件}} = T_{\text{基本}} + T_{\text{辅助}} + T_{\text{布置}} + T_{\text{休息}}$$

缩短时间定额就可提高劳动生产率, 特别应该缩减占时间定额比较大的那部分时间。在大批大量生产中, 基本时间所占比重较大。例如, 工件在多轴自动车床上加工时, 基本时间占 69.5%, 而辅助时间仅占 21%, 这时就应该设法在缩减基本时间上采取措施。而在单件小批量生产中, 辅助时间和准备与终结时间所占的比重较大。例如, 在普通车床上进行某一零件的小批量生产时, 基本时间占 26%, 而辅助时间占 50%, 这时就应着重在缩减辅助时间上采取措施。

6.1.2 缩短基本时间

1. 提高切削用量 如强力切削和大进给切削。

随着新刀具材料的出现, 切削速度得到了迅速提高。用硬质合金刀具的切削速度一般可达 200m/min; 陶瓷刀具的切削速度可达 500m/min; 用聚晶金刚石或聚晶立方氮化硼刀具的切削速度可达 900m/min, 切削硬度为 HRC60 以上淬火钢或高镍合金钢, 在切削温度 980℃ 时, 仍保持红硬性。高速滚齿机的切削速度已有高达 305m/min 的, 滚切一个直径 50mm、模数 2mm、厚度 20mm 的齿轮, 仅用 18s。高速磨削时的砂轮速度已达 60~120m/s, 实验室采用的磨削速度已高达 200m/s。缓进给强力磨削一次最大切深可达 6~12mm, 比普通磨削的金属去除率可提高 3~5 倍。

2. 减少切削行程长度 如采用多刀多刃切削, 多件同时加工。

用几把车刀同时加工同一个表面, 用宽砂轮做切入磨削, 生产率均可大大提高。某厂用宽 300mm、直径为 600mm 的砂轮以切入法磨削花键轴上长度为 200mm 的表面, 单件时间由原来的 4.5min 减少到 45s。

采用了上述措施可以大大提高切削效率, 但是机床的刚度也必须大大增强, 驱动功率也要加大。这样, 机床的结构和布局也必须随之改变, 需要设计新型的机床。如果在原有的机床上

加大切削用量,就容易引起机床-工作-刀具系统的受力变形,产生振动等,影响加工质量。所以,在原有的机床上提高切削用量,要经过充分的科学实验和机床改装。

6.1.3 缩短辅助时间

随着基本时间的减少,辅助时间在单件时间中所占的比重越来越高,若比重在 55%~77% 以上,则调高切削用量,对提高生产就不生产显著的效果,因此必须从缩短辅助时间着手。

1. 直接缩减辅助时间

(1) 采用先进夹具。采用先进夹具不仅可以保证加工的质量,而且能大大节省工件的装卸、找正时间。在大批量生产中,可采用高效率的气动、液压快速夹具,使装卸工间时间大为缩短。在成批生产中,采用拼装夹具和可调整夹具;在单件小批生产中,采用组合夹具。

(2) 采用各种快速换刀、自动换刀装置。由于加工中刀具磨损需要更换,工人在刀具的装卸、刃磨、对刀等方面要花费很多时间,为了节省这部分辅助时间,可采用各种快换刀夹及自动换刀装置。

2. 使辅助时间与基本时间重合

(1) 采用两工位或多工位的加工方法,可以缩短工件装卸时间。当一个工位上的工件在进行加工时,同时在另一个工位的夹具中装卸工件,这样就使装卸工件的辅助时间和基本时间重合起来。回转式夹具、多轴自动机的上下料,回转工作台式多工位组合机床等都是采用了这一原则,使辅助时间大为减少。现在国外生产的钻、铣、镗加工中心机床、磨床等还采用双工作台或多工作台。

(2) 采用两个相同夹具交替工作。例如,在多刀半自动车床和外圆磨床上加工以心轴定位的工件时,可采用两个同样的心轴。在机床进行加工的时间内,用另一个心轴进行装卸工件。

(3) 采用主动检验或数字显示式自动测量装置。主动检验的自动测量装置能在加工过程中测量工件的实际尺寸,并能用测量的结果控制机床的自动循环。数字显示装置是以光栅、感应同步器等为检测元件,把零件在加工过程中的尺寸变化连续显示出来。采用数字显示装置后,能够很直观地反映出刀具的位移量,提高工件的加工精度,同时又大大节约了停机测量的时间,减轻了工人的劳动强度。

6.1.4 同时缩短基本时间和辅助时间

(1) 多件加工:机床在一次装夹下同时加工几个工件,从而使分摊到每个工件上的基本时间和辅助时间都能缩短。多件加工的效果在龙门刨床、龙门铣床上最为显著,它又可根据情况的不同分为顺序加工、平行加工、平行顺序加工,如图 6-1~图 6-3 所示。

(2) 采用多刀多刃加工及成型切削:多刀多刃加工是一种行之有效的提高劳动生产率的方法,如图 6-4 所示。六角车床、多刀车床、多轴钻床、龙门铣床等都是为了充分发挥多刀多刃加工的效果而设计制造出来的高效率机床。

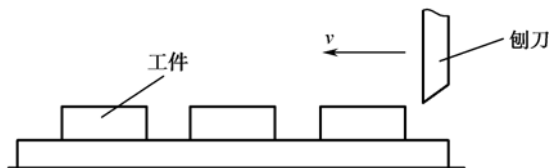


图 6-1 顺序加工

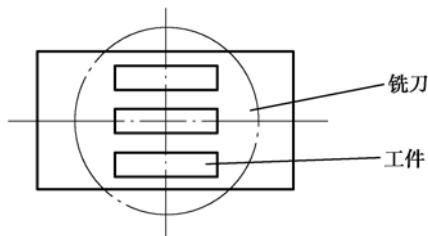


图 6-2 平行加工

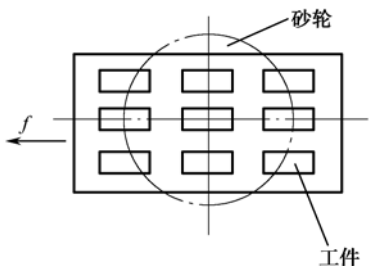


图 6-3 平行顺序加工

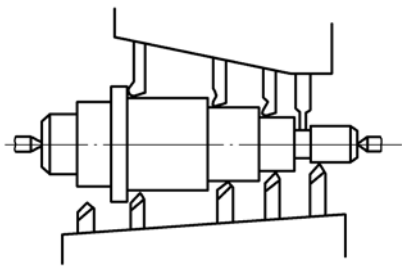


图 6-4 多刀加工

成型切削也是提高生产率的一种方法。它又可分为用成型刀具切削和用仿形法切削两种。前者适用于尺寸较小的成型表面，后者适用于尺寸较大的成型表面加工。用单线或多线砂轮磨螺纹、用蜗杆砂轮展成法磨小模数齿轮，都是采用成型刀具切削的例子；用液压仿形刀架在液压仿形车床上加工床主轴就是仿形法切削的例子。

(3) 采用各种类型的半自动机、自动机、多工位机床，组合机床、自动线等：这些机床都是在多件加工、多刀多刃加工的基础上发展出来的高效率机床，它们不但缩短基本时间和辅助时间，而且由于机床的机械化自动化程度提高，可以大大减少加工的总人数。

6.1.5 缩短准备终结时间

应用高生产率的机床，如多刀车床、六角车床、半自动和自动车床等，调整和安装刀具经常耗费较长时间。在加工一批零件之后，如果更换零件的类型和尺寸，也必须更换夹具，缩减刀具、夹具或其他工具在机床上的安装和调整时间，这是成批生产中提高劳动生产率的关键性工艺问题之一。

(1) 按照相似零件组的要求设计夹具和布置刀具：对被加工零件进行选择，要求它们的结构形状、技术条件都比较相似，根据这组相似零件的要求设计夹具和布置刀具，可以减少零件更换时刀具和夹具的调整时间。

(2) 采用可换刀架或刀夹：例如，六角车床的转塔刀架能快速更换，每个机床配备几个备用刀架，按照加工对象预先调整，等待使用。

(3) 采用刀具的微调机构和对刀的辅助工具：在多刀加工时，往往要耗费大量工时在刀具调整上，如果每把刀具的尾部都装上微调螺钉，就可使调整时间大为减少。

(4) 采用准备与终结时间极少的先进设备：如液压仿形刀架、插销板式程序控制机床等，这类机床特点是所需的准备与终结时间很短，可以灵活改变加工对象。

6.2 提高劳动生产率的综合性措施

6.2.1 改进产品结构设计

(1) 减少零件的数目和重量。在满足产品性能要求的前提下,尽量减少零件的数目和重量,这样既能减少加工劳动量,又能节约原材料。

(2) 改善零件的结构工艺性。零件的结构工艺性对工艺过程和加工工时的影响很大。要使零件便于加工、装配、修理,也便于采用高效率的机床设备和工艺,零件必须有良好的结构工艺性。

(3) 尽量提高零件、部件和产品的通用化、标准化和系列化程度。这样可以减少设计的工作量,扩大加工零件的批量。既容易保证加工质量的稳定,又有利于采用高效率的加工方法和设备。

6.2.2 改进产品加工工艺

采用先进工艺和新工艺经常可成倍地甚至十几倍地提高生产率。例如,用线电极电火花加工机床加工冲模可以减少很多钳工工作量;用混气电解加工锻模,一个锻模的加工时间从四五十个小时缩短到一两个小时;用强力磨代替铣平面,不但可以一次切去大部分余量,而且磨出的平面精度高,可直接用做定位面。

在毛坯制造中,冷热挤压、粉末冶金、失蜡浇铸、爆炸成型等新工艺的应用,可以从根本上减少大部分的机械加工劳动量,节约原材料,从而获得十分显著的经济效果。例如,用粉末冶金制造齿轮油泵的内齿轮,就完全取消了齿形加工,只需要磨两个平面;用冷挤压齿轮代替剃齿,生产率可提高4倍。

6.2.3 改善产品生产组织和管理方式

(1) 采用先进的生产组织形式——流水线生产。这种方法不仅适用于大批量生产,在成批生产中也得到了推广应用,因此出现了可变流水线、成组加工流水线等组织形式。

(2) 改进生产管理。做好各项技术准备工作,合理制订生产计划,调配好劳动力,同时做好工作的组织和服务工作。

6.2.4 采用计算机技术

在生产技术准备和制造过程的各个环节中,广泛采用计算机进行各种信息的处理,已成为如今提高产品的质量和劳动生产率、降低成本的有效措施。

应当指出,生产率并不是评价工艺过程的唯一指标。在机械加工中,质量、生产率与经济性三者之间存在着辩证的关系。首先,提高劳动生产率的措施必须以保证产品质量为前提,否

则毫无意义。其次,提高生产率要有成本核算观点。在工艺过程中,若不恰当地采用自动化程度高的、复杂而又昂贵的设备,则生产率虽然有所提高,但由于设备折旧费太大,结果加工成本反而提高了。因此必须全面地考虑保证质量、提高生产率和降低成本之间的关系。

6.3 工艺方案的技术经济性分析

制订某一工件的机械加工工艺规程时,在同样能满足被加工工件的各项技术要求的条件下,一般可以拟定出几种不同的加工方案,其中有些方案具有很高的生产率,但投资大;另一些方案则可能投资节省,但生产率低;不同的工艺方案就有不同的经济效果。为了选取最佳方案,必须对不同的工艺方案进行技术、经济分析和评比。

所谓经济分析,就是通过比较不同工艺方案的生产成本,选出最经济的工艺方案。生产成本是制造一个零件或一台产品必需的一切费用的总和,包括两大类费用:第一类是与工艺过程直接有关的费用;第二类是与工艺过程无关的费用(行政人员工资、厂房折旧、照明取暖等)。与工艺过程直接有关的费用叫做工艺成本,约占工件(或产品)生产成本的70%~75%,对工件工艺方案进行分析时不用全面分析工件(或产品)生产成本中的所有费用,只要分析与工艺过程直接有关的工艺成本即可,因为在同一生产条件下与工艺过程无关的费用基本上是相等的。

6.3.1 工艺成本的组成

工艺成本由可变费用(V)与不变费用(S)两部分组成。

1. 可变费用 V

可变费用是与工件(或产品)年产量有直接关系的那部分费用,即随年产量的增减而成比例变动的费用。它包括材料费或毛坯费用、工人的工资、机床电费、万能机床和万能工装(夹具、辅具及刀具)的维护费和折旧费等。可变费用的单位是元/件。

2. 不变费用 S

不变费用是与工件(或产品)年产量无直接关系的费用,不随年产量的增减而变动。它包括调整工人的工资,以及专用机床、专用刀具、专用夹具的维护费和折旧费用。因为专用机床、专用刀具和专用夹具是专为加工某工件所用的,它不能用来加工其他工件,如果产量不够大,负荷不满时,它就闲置不用。由于设备的磨损包括有形磨损和无形磨损(因科学技术不断进步,设备价值不断下降而产生的经济损失)两部分,设备的折旧年限是一定的,所以专用机床和专用夹具的费用与工件(或产品)的年产量无直接关系。不变费用的单位是元/年。

6.3.2 工艺成本的计算

各项费用均先按工序进行计算,然后算出各工序该项费用的总和。

1. 可变费用

可变费用可按下式计算：

$$V = C_{\text{材坯}} + C_{\text{操工}} + C_{\text{电}} + C_{\text{通机}} + C_{\text{机维}} + C_{\text{刀}}$$

式中, $C_{\text{材坯}}$ 为材料或毛坯费 (元/件); $C_{\text{操工}}$ 为操作工人的工资 (元/件); $C_{\text{电}}$ 为机床电费 (元/件); $C_{\text{通机}}$ 为通用机床折旧费 (元/件); $C_{\text{机维}}$ 为通用夹具费 (元/件); $C_{\text{刀}}$ 为刀具费用 (元/件)。

2. 不变费用

不变费用可按下式计算：

$$S = C_{\text{调工}} + C_{\text{专机}} + C_{\text{专机维}} + C_{\text{专夹}}$$

式中, $C_{\text{调工}}$ 为调整工人工资 (元/年); $C_{\text{专机}}$ 为专用机床折旧费 (元/年); $C_{\text{专机维}}$ 为专用机床维修费 (元/年); $C_{\text{专夹}}$ 为专用夹具费 (元/年)。

若工件的年产量为 N , 则工件的全年工艺成本 E (元/年) 为

$$E = N \cdot V + S$$

单件工艺成本 E_d (元/年) 为

$$E_d = V + S/N$$

以上两式也可以用于计算单个工序成本。

图 6-5 所示为全年工艺成本 E 与年产量 N 的关系。由图可知, E 与 N 是线性关系, 即全年工艺成本与年产量成正比。直线的斜率为工件的可变费用, 直线的起点 (截距) 为工件的不变费用。

图 6-6 所示为单件工艺成本与年产量的关系。由图可知, E_d 与 N 呈双曲线关系, 当 N 增大时, E_d 逐件减小, 极限值接近可变费用。

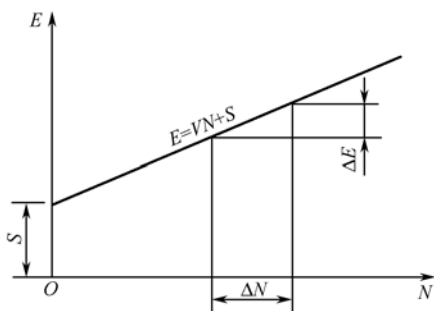


图 6-5 全年工艺成本与年产量的关系

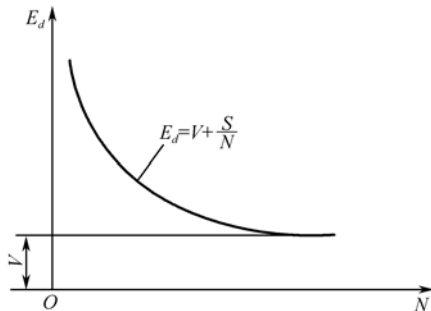


图 6-6 单件工艺成本与年产量的关系

6.3.3 工艺方案比较及经济性分析

工艺过程的不同方案进行评比时, 常用工件的全年工艺成本进行比较。这是因为全年工艺成本与年产量呈线性关系, 容易比较。

设两种不同方案分别为 I 和 II。它们全年的工艺成本分别为

$$E_1 = V_1 N + S_1$$

$$E_2 = V_2 N + S_2$$

两种方案评比时,往往一种方案的可变费用较大时,另一种方案的不变费用就会较大。如果某方案的可变费用和不变费用均较大,那么该方案在经济上是不可取的。

现在同一坐标图上,分别画出方案 1 和方案 2 的全年工艺成本与年产量的关系,如图 6-7 所示。两条直线相交于 $N=N_K$ 处,该年产量 N_K 称为临界年产量,达此年产量时两种工艺路线全年的工艺成本相等,即

$$V_1 N_K + S_1 = V_2 N_K + S_2$$

当年产量 $N < N_K$ 时宜采用方案 II,即年产量小时宜采用不变费用较少的方案;当年产量 $N > N_K$ 时,宜采用方案 I,即年产量大时宜采用可变费用较少的方案。

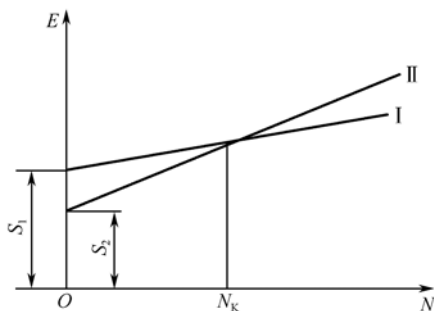


图 6-7 两种方案全年工艺成本的评比

当两种工艺方案的基本投资差额较大时,则在考虑工艺成本的同时还要考虑基本投资差额的回收期限。投资回收期越短,经济效果就越好。一般计算回收期应满足以下要求:

(1) 回收期应小于所用设备和工艺装备的使用年限。

(2) 回收期应小于市场对该产品的需求年限。

(3) 回收期应小于国家规定的标准使用年限。例如,采用新夹具的标准回收期通常规定为 2~3 年,采用新的通用机床一般规定为 4~6 年。

6.4 高效及自动化加工

6.4.1 大批大量生产常用的加工方法

由于这种生产类型的零件批量大,生产稳定,经常采用组合机床和组合机床自动线。

组合机床自动线是大批大量生产中最为合适的生产方式。在这种生产中,工作时自动从一个工作输送到下一个工作,整个工作循环都自动进行。这种生产方式的生产率极高,国外自动线平均节拍已达 10s,最短可达 2s。

6.4.2 中小批生产常用的加工方法

虽然在大批大量生产中应用了各种自动化设备,能得到很高的生产率。但是,在机械加工中,属于大批大量生产的产品是少数,不超过 20%。因此,研究成品生产的自动化是当前的方

向之一。

对于一种产品，由于各种零件的功用和结构的不同，一般可分为如下三种。

(1) 主要零件：指产品中的大型零件或精密零件，如各种机座、箱体、壳体、主轴、丝杠等。

(2) 中型零件：指一般的转动的轴、齿轮、拨叉、杠杆等。

(3) 小型零件：指各种紧固件，如螺钉、销子、垫圈等。

由于这三类零件的数量不同，在产品零件的总数中所占的比例不同，它们在生产成本中所占的比例也不同。

有研究表明：主要零件的数量虽然只占零件总数的 10%，但是它们的制造成本占总制造成本的 50%；中型零件的数量占零件总数的 40%，它们的制造成本占总成本的 30%；小型零件的数量占零件总数的 50%，但它们的制造成本只占总制造成本的 20%。主要零件制造成本比较高的原因是它们消耗较多的材料，而且一般来说它们的机械加工工作量也较大。

对中小型产品而言，国外一般是：主要零件以采用加工中心最为经济；小型零件由于标准化而需要的数量较大，常用专用的自动机或通用的自动机。

一般自动机工作循环几乎都是凸轮操纵的，每更换一种工作就要更换或制造一套凸轮，周期长、成本高，只用于大批大量生产。为适应中小批生产，出现了由液压和电器操纵的自动机，如各种类型的半自动和全自动的磨床、自动化的插齿机等。这类自动机更换加工对象时，容易调整。

插销板式程序控制系统可以极为方便、迅速地调整出所需要的自动控制程序，使一般常用的自动机可以推广到极小批量生产中，当插销式程序控制系统和半自动液压仿形系统结合起来使用时，就为自动机的完善开辟了广阔的前景。

数控技术和微处理器的发展，已使单件小批量生产过程自动化取得和大批大量生产一样高的技术经济指标成为可能。数控机床非常适合批量小、周期短、改型频繁、形状复杂、精度要求高的中小批零件的加工。国外在生产中已大量运用数控机床。例如在日本机床生产中，采用数控机床占全厂金属切削机床总数的 5%~8%，个别工厂已达 12%。

加工中心机床又称为多工序自动换刀机床，是由数控机床演变而成的新型机床。这种机床一般是一种带有多个坐标控制而可自动换刀的镗铣床。为了适应不同性质的加工需要，加工中心可以实现点位控制（如钻、镗）或连续控制（如铣）。这种机床是把许多相关的分散工序集中在一起，形成了一个以工件为中心的多工序自动加工机床，各种刀具装在一个刀库中，可根据指令进行自动换刀。这样，加工中心便可完成钻、扩、铰、镗、铣、攻丝等复杂零件的各方面（除底面以外）加工，适用于非回转零件的加工。

为实现回转件的高效自动化加工，近年来还发展了车削加工中心和磨削加工中心机床。

6.4.3 各种自动化系统的经济性比较分析

蒂巴尔（De Berr）对各种不同的自动化系统加工零件的制造成本做了定性的分析（如图 6-8 所示）。

从图中可以看出：对各种制造系统的选择，主要取决于批量的大小。

人工操作只适用于最小批量的生产，它不仅生产率低，而且单件制造成本也高。

自动线适用于大批大量生产，它的生产率高，单件制造成本低，所以具有较好的发展前途。

自动机适用于中批以上零件的生产,单个制造成本比数控机床高一些。

通过以上分析可知:要得到合格的产品,可以用各种不同的加工方法。根据批量的大小不同,应该选择生产率高、制造成本低的最佳方案。

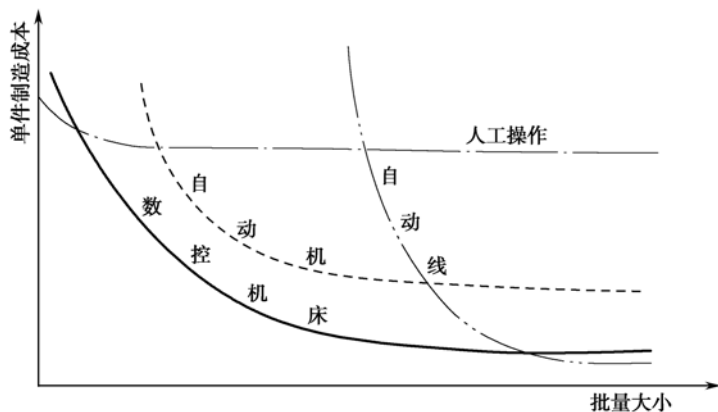


图 6-8 各种自动化系统加工零件的制造成本比较

6.5 机械加工的优化

优化技术在工程上应用很广。随着计算机技术在制造领域内应用的普及与发展,在计算机辅助编制工艺过程和自动数控编程中,都需要应用优化分析技术。

6.5.1 概述

(1) 优化的评价指标。优化的总目标是高效、经济的制造所需产品,具体而言,可使用下述三种基本的评价指标:

① 最少时间或最大生产率指标:它是指制造单位产品所需的时间最少,或是使单位时间内制造的产品数量最多。当对产品需求迫切时,通常采用这一指标,这时成本和利润指标退居次要地位。

② 最低成本指标:是指单台产品的成本最低。当时间充裕时,可采用这一指标。

③ 最大利润指标:是指在规定时间内利润最大。当市场需要大于工厂生产能力时采用这一指标。这时不追求最低生产成本,通过增加生产投资来减少单件生产时间,以便生产和销售更大数量的产品,使在规定的时间内比按最低生产成本指标生产获得更大的总利润。

(2) 优化应考虑的问题。

① 目标函数:首先应考虑优化的目标,并建立目标函数。

② 约束条件:优化时应考虑工艺系统性能和零件加工要求等的限制,如机床的极限转速、进给量、最大功率、切削力、扭矩、零件加工表面的粗糙度、工艺系统刚度等约束条件。

③ 控制参数:对于机械加工系统,一般的控制参数为切削速度 v 、进给速度 f 和切深 a_p 。对于一般系统,指控制一个参数(v 或 f);对于优化程度高的系统,可以同时控制两个参数(v 和 f)或三个参数(v 、 f 、 a_p)。由于切削深度往往由工件材料和零件尺寸决定,所以假定为常数。

④ 随机因素：随机因素如材料性能的变化、工艺系统的动态特性、刀具磨损、热变形等，往往影响最优工作的条件。为此，在加工过程中采用适应性控制是解决随机因素对加工优化影响的有效措施。

6.5.2 单工序切削用量的优化

1. 基本数学模型

以前述三种评价指标为基础，可以建立如下基本数学模型。

(1) 单件生产时间 t_p (min/件)：

$$t_p = t_m + t_a + t_c \frac{t_m}{t} \quad (6-1)$$

式中， t_m 为基本时间，指切去金属所耗费的机动时间 (min/件)； t_a 为切削加工所需要的辅助时间 (min/件)； t_c 为更换一次刀具所需要的时间 (min)； t 为刀具耐用度 (min)。

(2) 生产量 Q (件/min)：

$$Q = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_m + t_a + t_c \frac{t_m}{t}} \quad (6-2)$$

(3) 单件成本 S_i (元/件)：

$$S_i = m_c + (k_l + k_m)t_m + k_l t_a + (k_l t_c + k_l) \frac{t_m}{t} \quad (6-3)$$

$$k_i = k_d + k_l$$

式中， m_c 为原材料费用 (元/件)； k_d 为直接劳动力费用 (元/min)； k_l 为间接费用，包括机床折旧费和一般管理费 (元/min)； k_m 为加工所需的经常费用，如电费、切削润滑油费用 (元/min)； k_l 为每把刀具的费用 (元)。

(4) 单件利润 g (元/件)：

$$g = u - S_i$$

式中， u 为单件出售价格 (元/件)。

(5) 单位时间利润 G (元/min)

$$G = \frac{u - S_i}{t_p} \quad (6-4)$$

2. 目标函数

为确定最优进给速度 f 与切削速度 v ，必须建立以 f 、 v 为函数形式的目标函数。在上述的数学模型中， t 和 t_m 都取决于 f (mm/r)、 v (m/min)。根据切削原理，广义的刀具耐用度可以用下式表达：

$$t f^{m_0} v^{n_0} = C_0 \quad (6-5)$$

式中， m_0 、 n_0 、 C_0 为常数。

单件基本时间可表示成 f 、 v 的函数:

$$t_m = \frac{\lambda_0}{f \cdot v} \quad (6-6)$$

式中, λ_0 为切削加工常数。

将式 (6-5)、式 (6-6) 代入式 (6-1)、式 (6-3) 得

$$t_p = \frac{\lambda_0}{fv} + t_a + t_c \frac{\lambda_0}{C_0} f^{\frac{1}{m_0}-1} v^{\frac{1}{n_0}-1} \quad (6-7)$$

$$S_i = m_c + (K_l + K_m) \frac{\lambda_0}{fv} + K_l t_a + (K_l t_c + K_t) \frac{\lambda_0}{C_0} f^{\frac{1}{m_0}-1} v^{\frac{1}{n_0}-1} \quad (6-8)$$

式 (6-7) 和式 (6-8) 在函数结构上是相似的, 若忽略常数项, 则可写出目标函数的通式:

$$Z = \frac{1}{fv} + af^m v^n \quad (6-9)$$

$$m = \frac{1}{m_0} - 1, \quad n = \frac{1}{n_0} - 1 \quad (6-10)$$

按最高生产率指标有

$$Z = \frac{t_p}{\lambda_0} \quad ; \quad a = \frac{t_c}{C_0} \quad (6-11)$$

按最低生产率指标有

$$Z = \frac{S_i}{(K_l + K_m) \lambda_0} \quad ; \quad a = \frac{(K_l t_c + K_t)}{(K_l + K_m) C_0} \quad (6-12)$$

将式 (6-9) 分别对 f 、 v 求偏导, 并令其为零, 则可得出方程在无约束条件下的最小值, 即

$$\frac{\partial z}{\partial f} = -\frac{1}{f^2 v} + amf^{m-1} v^n = 0, \quad \text{即 } amf^{m+1} v^{n+1} = 1$$

$$\frac{\partial z}{\partial v} = -\frac{1}{fv^2} + anf^m v^{n-1} = 0, \quad \text{即 } anf^{m+1} v^{n+1} = 1$$

按上述两式, 可得到 f -最小曲线和 v -最小曲线。

f -最小曲线:

$$fv^{\frac{(n+1)}{(m+1)}} = \frac{1}{(am)^{\frac{1}{m+1}}} \quad (6-13)$$

v -最小曲线:

$$fv^{\frac{(n+1)}{(m+1)}} = \frac{1}{(an)^{\frac{1}{m+1}}} \quad (6-14)$$

在实际加工中, 通常 $m < n$, 所以 f -最小曲线位于 v -最小曲线之上, 如图 6-9 所示。

为了求得 Z 的最小值, 若固定 v_1 , 求得 Z_1 值在 B 点上, 由点 B 再固定 f_1 , 求得 Z_2 值在 C 点上, 显然, $Z_2 < Z_1$ 。再从 Z_2 点出发, 又求得 $Z_3 \cdots \cdots$ 当 $f \rightarrow \infty$ 和 $v \rightarrow 0$ 时, Z 值将无限减小, 式 (6-9)

在无约束条件下求得最小值，不可能得出一组最优进给速度和切削速度的唯一解。所以，要实现优化必须考虑制造的约束条件。

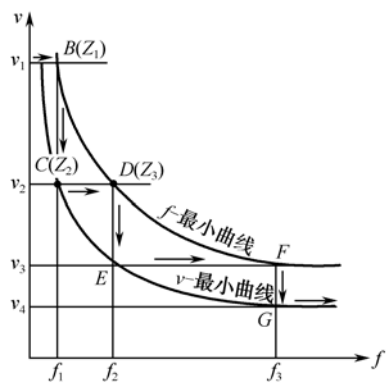


图 6-9 $m < n$ 时, f 和 v 的最小曲线

3. 约束条件

(1) 切削速度约束条件:

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$$

式中, v_{\min} 和 v_{\max} 是由工件直径以及机床上最低和最高主轴转速决定的最低和最高切削速度。

(2) 进给速度约束条件:

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$$

式中, f_{\min} 和 f_{\max} 是所用机床上限定的最低和最高进给速度。

(3) 工件表面粗糙度约束条件:

$$\frac{f^2}{8R} \leq R_y$$

式中, R 为刀具的刀尖圆弧半径 (mm);

R_y 为工件允许的表面轮廓最大高度 (mm)。

$$f \leq \sqrt{8RR_y} = f_a \tag{6-15}$$

根据约束条件 (2) 和 (3) 得:

$$f_{\min} \leq f \leq \min(f_{\max}, f_a)$$

(4) 功率约束条件:

$$\frac{\gamma a_p^a f^\beta v}{60 \times 1000} \leq P$$

式中, a_p 为切削深度 (mm); α 和 β 为接近于 1 的正值; γ 为材料的单位切削抗力 (N/mm²); P 为机床电机功率 (kW)。

为说明问题方便, 假设 $f_{\min}=0$, $v_{\min}=0$, 并取 $b=\min(f_{\max}, f_a)$, $C=v_{\max}$, $N=\frac{60000P}{\gamma a_p^a}$, 则上

述约束条件归纳为

$$0 \leq v \leq C \tag{6-16}$$

$$0 \leq f \leq b \quad (6-17)$$

$$f^\beta v \leq N \quad (6-18)$$

根据式(6-18)可求得 fv 约束线的切线斜率为

$$\left. \frac{dv}{df} \right|_{fv} = -\frac{\beta v}{f}$$

按式(6-9)可求得 $Z=h_i$ (h_i 为某一定值, $i=1, 2, 3, \dots$) 时, 轮廓曲线的切线斜率为

$$\left. \frac{dv}{df} \right|_z = -\frac{v - amf^{m+1}v^{n+2}}{f - anf^{m+2}v^{n+1}}$$

一般情况下:

$$\left. \frac{dv}{df} \right|_{fv} \neq \left. \frac{dv}{df} \right|_z$$

通常 $m \neq n$, fv 约束线与 Z 等值线有交点存在。

图6-10中, DC 为 v 约束线, AB 为约束线, BC 为 fv 约束线, 又 $v_{\min}=0$, $f_{\min}=0$, 故 $OABCD$ 是满足约束条件式(6-16)、式(6-17)、式(6-18)的求解可行域。图中点画线为 v -最小曲线, 其余曲线都是 Z 等值线。

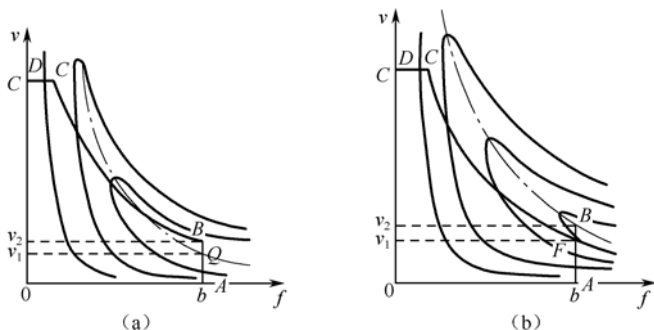


图6-10 有约束条件优化的两种情况

当 $m < n$ 时, 式(6-9)在有约束条件下的最小值出现在 f 约束线($f=b$)上, 如图6-10所示。这时有如下两种情况:

- (1) 出现在 f 约束线和 v -最小曲线(即 $Z=h_i$ 等值曲线顶点的连线)的交点 Q 上, 如图6-10(a)所示。
- (2) 出现在 f 约束线和 fv 约束线的交点 F 上, 如图6-10(b)所示。

4. 确定最优进给速度和切削速度的算法

(1) 确定最优进给速度:

$$f^* = b = \min(f_{\max}, f_a) \quad (6-19)$$

(2) 计算对应于 f^* 的切削速度 v_1 和 v_2 。

将 $f=f^*=b$ 代入式(6-14)得:

$$v_1 = v_Q = \frac{1}{(anb^{m+1})^{\frac{1}{n+1}}} \quad (6-20)$$

将 $f=f^*=b$ 代入式(6-18)得:

$$v_2 = v_F = \frac{N}{b^\beta} \quad (6-21)$$

(3) 确定最优切削速度。

$$v^* = \min(v_1, v_2) \quad (6-22)$$

5. 实例

已知：工件直径 $D = 50\text{mm}$ ，工件长 $L = 200\text{mm}$ ， $t_a = 0.75\text{min/件}$ ， $t_c = 1.5\text{min}$ ， $m_c = 400\text{元/件}$ ， $K_m = 5\text{元/min}$ ， $K_t = 250\text{元}$ ， $K_i = 50\text{元/min}$ ， $u = 1200\text{元/件}$ ， $m_0 = 0.55$ ， $n_0 = 0.23$ ， $C_0 = 1.51 \times 10^{10}$ ， $R = 0.8\text{mm}$ ， $R_y = 0.01\text{mm}$ ， $f_{\max} = 0.28\text{mm/r}$ ， $v \leq 345\text{m/min}$ ， $\beta = 0.85$ ， $a_p = 1\text{mm}$ ， $\alpha = 1$ ， $\gamma = 4900\text{N/mm}^2$ ， $P = 3.68\text{kW}$ ，按最低成本指标，确定车削工序的最优进给速度和切削速度。

解 按式(6-10)得： $m = 0.82$ ， $n = 3.35$ 。根据最低成本指标，按式(6-12)得： $a = 0.391 \times 10^{-9}$ 。

按式(6-15)得：

$$f_a = 0.252$$

$$b = \min(f_{\max}, f_a) = \min(0.28, 0.252) = 0.252$$

$$C = 345\text{m/min}$$

$$N = \frac{6000}{\gamma a_p^\alpha} = 45$$

因此，按成本最小指标，确定最优进给速度和切削速度是使得

$$\min Z = \frac{1}{fv} + 0.391 \times 10^{-9} f^{0.82} v^{3.35}$$

并满足

$$0 \leq v \leq 345$$

$$0 \leq v \leq 0.252$$

$$f^{0.85} v \leq 45$$

按式(6-19)得：最优进给速度 $f^* = b = 0.252\text{mm/r}$

按式(6-20)得： $v_1 = 196.1\text{m/min}$

按式(6-21)得： $v_2 = 145.2\text{m/min}$

按式(6-22)得：最优切削速度 $v^* = 145\text{m/min}$

6.5.3 多工序切削用量的优化

多工序切削用量的优化是以单工序切削用量的优化分析为基础，每道工序最优进给速度确定的方法与单工序相同，而各道工序最优切削速度的确定方法有所不同。限于篇幅，这里仅介绍方法的基本思想。

在一个零件的各道加工工序中，单件生产时间最长的工序称为关键工序。关键工序的单件工时决定了制造系统的周期时间。其他工序的单件生产时间都小于（或等于）周期时间，它们称为松弛工序。关键工序的最优切削速度可按最大生产率、最低成本及最大利润指标求得。若按最大生产指标求出关键工序的最优切削速度，则其相应的单件生产时间为最小，故又称为最优周期时间。确定各松弛工序的最优切削速度的约束条件是松弛工序的单件生产时间必须小于等于最优周

期时间。在满足这样的约束条件下，使松弛工序成本最低求出各松弛工序的最优切削速度。这就是确定各道工序最优切削速度的基本思想。

习题 6

- 6-1. 什么是劳动生产率？提高机械加工劳动生产率的工艺措施有哪些？
- 6-2. 生产成本和工艺成本有何区别？
- 6-3. 比较不同工艺方案经济性时需考虑哪些因素？

第 7 章

机器的装配工艺

7.1 概述

机器的质量是以机器的工作性能、使用效果、可靠性及寿命等综合指标来评定的。这些指标除与产品结构设计有关外，还取决于零件的制造质量（包括加工精度、表面质量、热处理等）和机器的装配工艺及装配精度。机器的质量最终是通过装配工艺来保证的。若装配不当，即使零件的制造质量都合格，也不一定能够装配出合格产品。反之，即使零件的质量不是十分良好，只要在装配中采取合适的工艺措施，也能使产品达到规定的要求。因此，装配工艺及装配精度对保证机器的质量具有十分重要的作用。

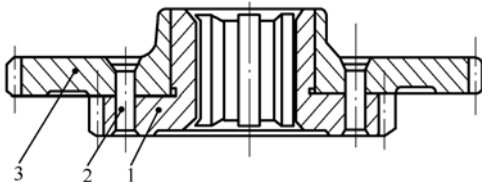
另外，通过机器的装配，可以发现机器设计上的错误（不合理的结构与尺寸等）和零件加工工艺中存在的质量问题，并加以改进。因此，机器装配工艺过程又是机器生产的最终检验环节。研究装配工艺、选择合适的装配方法、制订合理的装配工艺规程，不仅是保证机器装配质量的手段，也是提高产品生产效率、降低制造成本的有力措施。

7.1.1 机器装配的基本概念

任何一台机器一般都是由若干零件、套件（或合件）、组件和部件所组成的，为保证有效地进行装配工作，通常将机器划分为若干个能进行独立装配的部分，称为装配单元。按规定的技术要求，将零件结合成套件、组件和部件，并进一步将零件、套件、组件和部件结合成机器的工艺过程，称为装配。

零件是组成机器的基本单元,即最小单元。它是由整块金属或其他材料制成的。零件一般都预先装成套件、组件、部件后才安装到机器上,直接装入机器的零件并不太多。

套件是在一个基准零件上装上一个或若干个零件构成的,它是最小的装配单元。例如装配式齿轮(如图7-1所示),由于制造工艺的原因,分成两个零件,在基准零件1上套装齿轮3并用铆钉2固定。为此进行的装配工作称为套装。



1—基准零件; 2—铆钉; 3—齿轮

图 7-1 装配式齿轮

组件是在一个基准零件上装上若干套件及零件而构成的。例如机床主轴箱中的主轴,在基准轴件上装上齿轮、套、垫片、键及轴承的组合件称为组件。为此而进行的装配工作称为组装。

部件是在一个基准零件上装上若干组件、套件和零件而构成的。部件在机器中能完成一定的、完整的功用。把零件装配成为部件的过程,称为部装。例如,车床的主轴箱装配就是部装。主轴箱箱体为部装的基准零件。

在一个基准零件上,装上若干部件、组件、套件和零件就成为整个机器,把零件和部件装配成最终产品的过程,称为总装。例如,卧式车床就是以床身为基准零件,装上主轴箱、进给箱、溜板箱等部件及其他组件、套件、零件所组成的。

装配是产品的制造过程的最后阶段,产品的质量最终由装配来保证。一般的装配工作内容有以下几方面:

(1) 清洗。装配工作中清洗零部件对保证产品的质量和延长产品的使用寿命有重要意义。常用的清洗剂有煤油、汽油、碱液和多种化学清洗剂等,常用的清洗方法有擦洗、浸洗、喷洗和超声波清洗等。经清洗后的零件或部件必须有一定的中间防锈能力。

(2) 连接。装配过程中有大量的连接。常见的连接方式有两种:一种是可拆卸连接,如螺纹连接、键连接和销连接等;另一种是不可拆卸连接,如焊接、铆接和过盈配合连接等。

(3) 校正。校正是指在装配过程中对相关零件、部件的相互位置要进行找正、找平和相应的调整工作。

(4) 调整。在装配过程中对相关零件、部件的相互位置要进行具体调整,其中除了配合校正工作去调整零件、部件的位置精度外,还要调整运动副之间的间隙,以保证运动零件、部件的运动精度。

(5) 配作。用已加工的零件为基准,加工与其相配的另一个零件,或将两个(或两个以上)零件组在一起进行加工的方法叫配作。配作的工作有配钻、配铰、配刮、配磨和机械加工等,配作常与校正和调整工作结合进行。

(6) 平衡。对转速较高、运动平稳性要求高的机械,为了防止在使用中出现振动,需要对有关的旋转零件、部件进行平衡工作,常用的有静平衡法和动平衡法两种。

(7) 验收试验。机械产品装配完毕后,要按有关技术标准和规定,对产品进行全面检查和试验工作,合格后才能准许出厂。

7.1.2 装配系统图

名称	
编号	件数

图 7-2 装配单元的表示图

在装配工艺规程设计中，常用装配系统图表示零、部件的装配流程和零、部件间相互装配关系。在装配系统图上，每个单元用一个长方形框表示，标明零件、套件、组件和部件的名称、编号及数量，如图 7-2 所示。这个方框不仅可以表示零件，也可以表示套件、组件和部件等装配单元。

图 7-3~图 7-6 分别给出了套件、组件、部件和机器的装配系统图。在装配系统图上，装配工作由基准件开始沿水平线自左向右进行，一般将零件画在上方，套件、组件、部件画在下方，其排列次序就是装配工作的先后次序。

装配系统图是用图解法说明产品零件、组件和部件的装配程序，以及各装配单元的组成零件。在设计装配车间时可以根据它来组织装配单元的平行装配，并可以合理地按照装配顺序布置工作地点，将装配过程的运输工作减至最少。

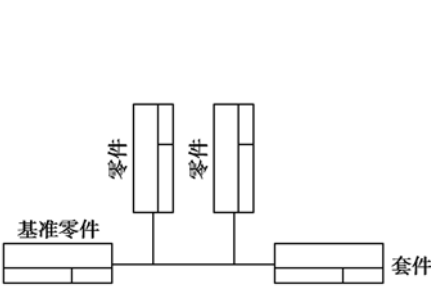


图 7-3 套件装配系统图

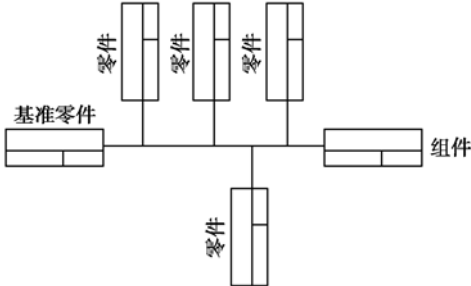


图 7-4 组件装配系统图

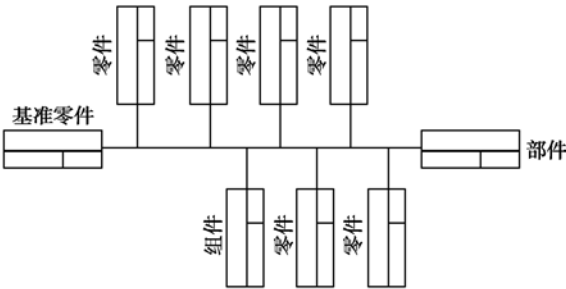


图 7-5 部件装配系统图

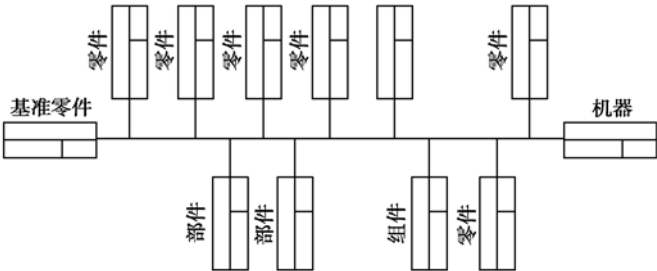


图 7-6 机器装配系统图

现以图 7-7 所示的某减速器低速轴组件为例，说明它的装配过程。

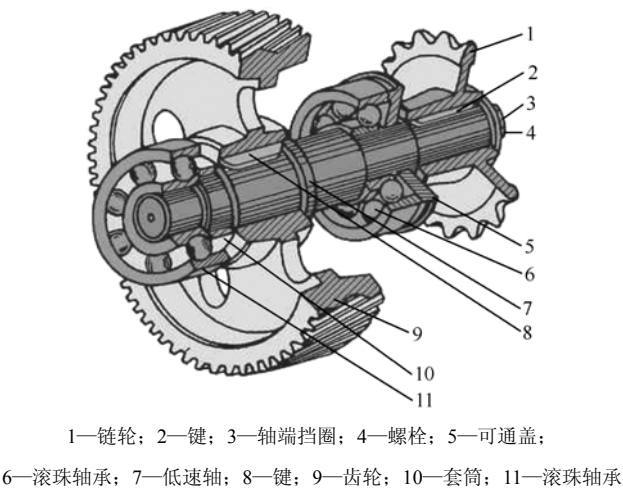


图 7-7 某减速器低速轴组件

装配过程可用装配系统图表示（如图 7-8 所示）。装配系统图绘制方法如下：

- (1) 先画一条横线。
- (2) 横线左端画一个小长方格，代表基准件。在长方格中注明装配单元的名称、编号和数量。
- (3) 横线的右端也画一个小长方格，代表装配的成品。
- (4) 横线自左至右表示装配的顺序。直接进行装配的零件画在横线的上面，组件画在横线下面。

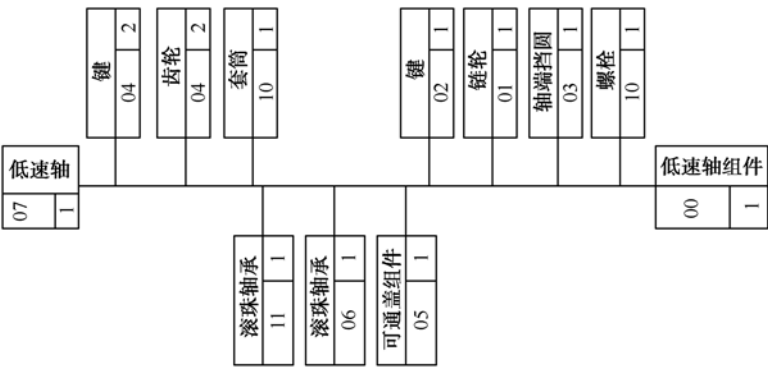


图 7-8 某减速器低速轴组件装配系统图

由装配工艺系统图可以清楚地看出成品的装配顺序以及装配所需零件的名称、编号和数量，因此可起到指导和组织装配工艺的作用。

7.1.3 装配精度与零件精度

1. 装配精度的概念

装配精度是指机器装配以后，各工作面间的相对位置和相对运动等参数与规定指标的符合程度。

装配精度不仅影响机器或部件的工作性能,而且影响它们的使用寿命。对于机床,装配精度将直接影响机床上加工零件的加工精度。装配精度是制订装配工艺规程的主要依据,也是确定零件加工精度的重要依据。因此,正确处理好机器或部件的装配精度问题,是产品设计的一个重要环节。

机器的装配精度是按照机器的使用性能要求而提出的,可以根据国际标准、国家标准、部颁标准、行业标准或其他有关资料予以确定,一般包括以下几种。

(1) 尺寸精度。尺寸精度是指相关零部件的距离精度和配合精度。例如,装配体中有关零件间的间隙;齿轮啮合中非工作齿面间的侧隙;相配合零件间的过盈量等。

(2) 相互位置精度。相互位置精度是指相关零部件间的平行度、垂直度及各种跳动等。例如,卧式铣床刀杆轴心线和工作台面的平行度,车床主轴前后轴承的同轴度等。

(3) 相对运动精度。相对运动精度是指有相对运动的零部件间在运动方向和运动位置上的精度。例如,车床溜板移动相对主轴轴心线的平行度;滚齿机滚刀垂直进给运动和工作台旋转轴心线的平行度等。

(4) 接触精度。接触精度是指相互接触、相互配合的表面接触面积大小及接触点的分布情况。例如,齿轮侧面接触精度要控制沿齿高和齿长两个方向上接触面积大小及接触斑点数。接触精度影响接触刚度和配合质量的稳定性,它取决于接触表面本身的加工精度和有关表面的相互位置精度。

不难看出,各装配精度之间存在密切关系,相互位置精度是相对运动精度的基础,尺寸精度和接触精度对相互位置精度和相对运动精度的实现又有较大影响。

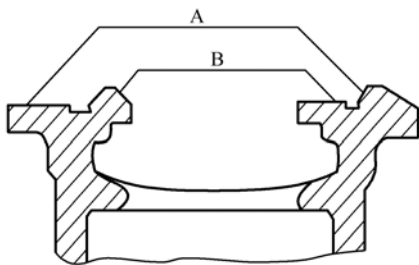
2. 装配精度与零件精度的关系

各种机器或部件都是许多零件有条件地装配在一起的。各个相关零件的误差累积起来,就反映到装配精度上。因此,机器的装配精度受零件特别是关键零件的加工精度影响很大。一般来说,零件的精度越高,装配精度则越容易得到保证。

但是,零件的加工精度受工艺条件、经济性的限制,特别是当装配精度要求较高时,不能简单按装配精度要求来加工。在适当控制零件加工精度的前提下,常常通过装配过程中的选配、调整或修配等手段来达到较高的装配精度要求。当然,装配过程中能否进行有关零件的选配、调整或修配工作,还要看装配体结构设计得是否合理。

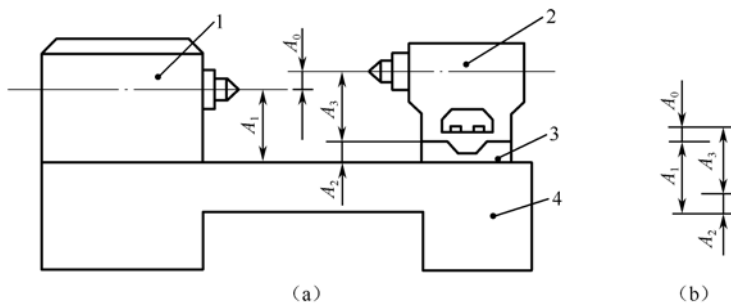
为了合理地确定零件的加工精度,必须对零件精度和装配精度的关系进行综合分析。而进行综合分析的有效手段就是建立和分析产品的装配尺寸链。

例如,在卧式车床装配中,要满足尾座移动对溜板移动的平行度要求,只要保证床身上溜板移动的导轨 A 与尾座移动的导轨 B 相互平行即可,如图 7-9 所示。也就是说,该项装配精度只和一个零件(床身导轨)有关,要保证该项装配精度只要保证该零件的精度即可,俗称“单件自保”。但是,多数装配精度均和相关的多个零件或部件的加工精度有关,即这些零件的加工误差的累积将影响装配精度。又如图 7-10 所示,卧式车床主轴锥孔中心线和尾座顶尖套筒中心线对床身导轨的等高度要求,则与床身 4、主轴箱 1、尾座 2 和底板 3 等零件的加工精度相关。



A—溜板导轨；B—尾座导轨

图 7-9 床身导轨简图



1—主轴箱；2—尾座；3—尾座底板；4—床身

图 7-10 主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高结构示意图

从上述分析中可以看出，在装配时零件的加工误差的累积将会影响产品的装配精度。在加工条件允许时，可以合理地规定有关零件的制造精度，使零件的累积误差不超出装配精度所规定的范围，从而简化装配工作，使之成为简单的连接过程，也就是不经过任何修配和调整。这对大批大量生产过程是十分必要的。但是，零件的加工精度不但受工艺条件的影响，还受到经济性的限制。特别是当产品装配精度要求较高时，控制零件加工精度来保证装配精度的方法，将给零件加工带来困难，这时常按经济加工精度确定零件的精度要求，使之易于加工，而在装配时采用一定的工艺措施（修配、调整等）来保证装配精度。应根据产品的性能、生产类型、装配条件来确定产品的装配方法。不同的装配方法，零件加工精度与装配精度具有不同的相互关系。为了定量分析这种关系，将尺寸链的基本理论应用于装配过程，即建立装配尺寸链并分析计算，可以很好地解决各种装配方法的装配精度与零件精度之间的关系问题。

7.2 装配尺寸链

7.2.1 装配尺寸链的建立

1. 装配尺寸链的基本概念

在机器的装配关系中，以装配所要保证的装配精度或技术要求作为封闭环，以相关零件的

相关尺寸或相互位置关系作为组成环所组成的尺寸链，称为装配尺寸链。在装配关系中，对装配精度有直接影响的零、部件的尺寸和位置关系，都是装配尺寸链的组成环。同工艺尺寸链一样，装配尺寸链也是由封闭环和组成环组成的，组成环也分为增环和减环。由于装配精度是零部件装配后才最后形成的尺寸或位置关系，所以装配尺寸链的封闭环就是装配所要保证的装配精度或技术要求，即封闭环不是某一零部件的尺寸，而是不同零部件之间的相对位置精度和尺寸精度。装配尺寸链也具有封闭性和关联性的特征。装配尺寸链是制订装配工艺、保证装配精度的重要工具。

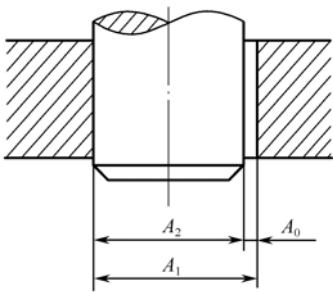


图 7-11 孔轴配合的装配尺寸

图 7-11 所示为孔轴配合的装配尺寸，装配后要求轴孔有一定的间隙。轴孔间的间隙 A_0 就是该尺寸链的封闭环，它是由孔尺寸 A_1 与轴尺寸 A_2 装配后形成的尺寸。在这里，孔尺寸 A_1 增大，间隙 A_0 （封闭环）也随之增大，故 A_1 为增环。同理，轴尺寸 A_2 为减环。

2. 装配尺寸链的分类

装配尺寸链按各环的几何特征和所处空间位置不同可分为如下三种。

- (1) 直线尺寸链：由长度尺寸组成，且各尺寸彼此平行，如图 7-10 (b)、图 7-11 所示。
- (2) 角度尺寸链：由角度、平行度、垂直度、同轴度等构成。例如，卧式车床精度标准规定精车端面的平面度要求：工件直径 $D \leq 200\text{mm}$ 时，端面只许凹 0.015mm 。该项要求可简化为图 7-12 所示的角度尺寸链。其中 α_0 为封闭环，即该项装配精度要求 $Ta_0=0.015/100$ 。 α_1 为主轴回转轴线与床身前棱形导轨在水平内的平行度， α_2 为溜板的上燕尾导轨对床身棱形导轨的垂直度。

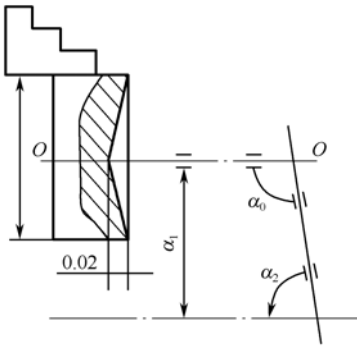


图 7-12 角度尺寸链

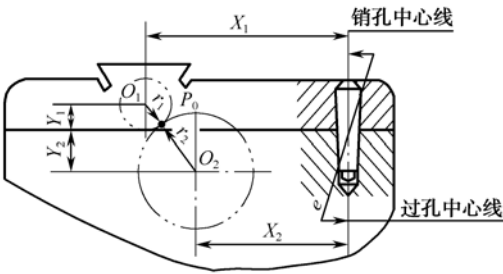


图 7-13 平面装配尺寸链

- (3) 平面尺寸链：由成角度关系布置的长度尺寸构成，且各环处于同一或彼此平行的平面内。例如，车床溜板箱装配在床鞍下面时，溜板箱齿轮 O_2 与床鞍横向进给齿轮 O_1 应保持适当的啮合间隙，这个装配关系构成了平面尺寸链，如图 7-13 所示。其中， X_1 、 Y_1 为床鞍上齿轮 O_1 的坐标尺寸； X_2 、 Y_2 为溜板箱上齿轮 O_2 的坐标尺寸； r_1 、 r_2 分别为两齿轮的分度圆半径； P_0 为两齿轮的啮合侧隙，是封闭环。

- (4) 空间尺寸链：由位于三维空间的尺寸构成。在一般机器装配中较为少见，故不做介绍。本章只讨论直线尺寸链。

7.2.2 装配尺寸链的查找

装配尺寸链的建立是在装配图的基础上,根据装配精度的要求,找出与该精度有关的零件及其相应的有关尺寸,并画出尺寸链图。这是解决装配精度问题的第一步。只有所建立的装配尺寸链是正确的,求解它才有意义。

装配尺寸链中,封闭环属于装配精度,很容易查找。组成环是与装配精度有关的零部件上的相关尺寸,因为涉及的数量一般较多,而与该尺寸链无关的零部件尺寸也较多,所以组成环的查找是建立装配尺寸链的关键所在。

1. 查找装配尺寸链的步骤

1) 明确装配关系

看懂产品或部件的装配图,看清各个零件的装配关系,弄清各个零件在产品或部件中是如何确定其空间位置的,从而找出各个零件的装配基准。

2) 确定封闭环

明确装配精度的要求,根据装配精度要求确定封闭环,即准确找到封闭环。

3) 查找组成环

以封闭环两端的那两个零件为起点,沿装配精度要求的方向,以相邻零件装配基准面间的联系为线索,分别找出影响该装配精度要求的相关零件,直至找到同一基准零件,甚至同一基准表面为止。这一过程与查找工艺尺寸链的跟踪法在实质上是一致的。找到相关零件后,其上下两装配基准面间的尺寸就是与该装配精度有关的尺寸,即组成环。

也可以从封闭环的一端开始,一直找到封闭环的另一端为止;或从共同的基准面开始,分头找到封闭环的两端。

无论哪一种方法,关键要使整个尺寸链完全封闭。

4) 画尺寸链图

当相关尺寸齐全后,即可像工艺尺寸链一样,画尺寸链图,并确定组成环性质。

2. 查找装配尺寸链应注意的问题

1) 简化性原则

机械产品的结构通常都比较复杂,对装配精度有影响的因素很多。查找尺寸链时,在保证装配精度的前提下,可以不考虑那些影响较小的因素,使装配尺寸链适当简化。

例如,图 7-10 表示车床主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高问题。车床主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高装配尺寸链如图 7-14 (a) 所示,其中: A_1 为主轴锥孔中心线至尾座底板距离; A_2 为尾座底板厚度; A_3 为尾座顶尖套锥孔中心线至尾座底板距离; e_1 为主轴滚动轴承外圆与内孔的同轴度误差; e_2 为尾座顶尖套锥孔与外圆的同轴度误差; e_3 为尾座顶尖套与尾座孔配合间隙引起的向下偏移量; e_4 为床身上安装主轴箱和尾座的平导轨间的高度差。

但由于 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 的数值相对 A_1 、 A_2 、 A_3 的误差而言是较小的,对装配精度影响也较小,故装配尺寸链可以简化成图 7-14 (b) 所示的结果。

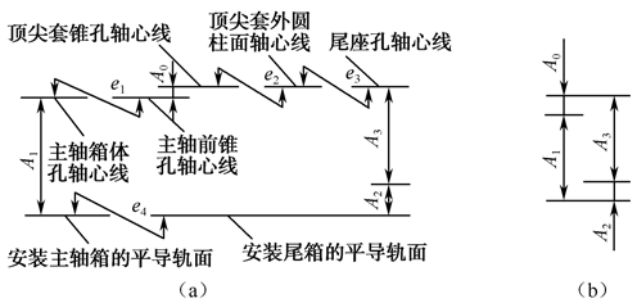


图 7-14 主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高装配尺寸链

需要指明的是，在精密装配中，这类问题不可随意简化，应慎重考虑所有对装配精度有影响的因素。

2) 最短路线原则

由尺寸链的基本理论可知，在装配精度既定的条件下，组成环数越少，则各组成环所分配到的公差值就越大，零件加工越容易、越经济。这样，在产品结构设计时，在满足产品工作性能的条件下，应尽量简化产品结构，使影响产品装配精度的零件数尽量减少。

在查找装配尺寸链时，每个相关的零、部件只应有一个尺寸作为组成环列入装配尺寸链，即将连接两个装配基准面间的位置尺寸直接标注在零件图上。这样组成环的数目就等于相关零、部件的数目，即“一件一环”。最短路线原则也可以称为“环数最少”原则或“一件一环”原则。

但也应注意，“一件”一定要“一环”，绝不可随意减少任意“一环”。

如图 7-15 所示，齿轮装配后轴向间隙尺寸链就体现了“一件一环”的原则。如果把图中的轴向尺寸标注成图 7-16 所示的两个尺寸，就违反了“一件一环”的原则，其装配尺寸链的构成显然不合理。

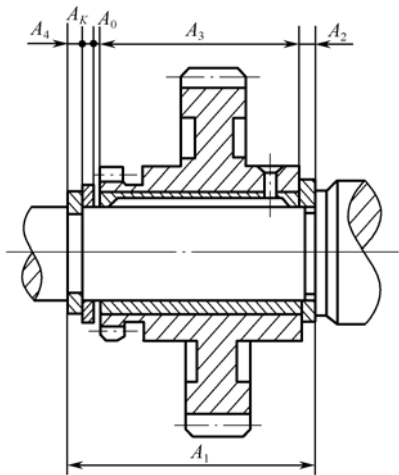


图 7-15 装配尺寸链的“一件一环”原则

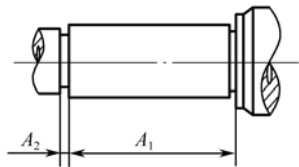


图 7-16 组成环尺寸的不合理标注

3) 方向性原则

同一装配结构中,在不同位置方向都有装配精度的要求时,应按不同方向分别建立装配尺寸链,不同方向上的无关尺寸不可随意混淆。例如蜗杆副传动结构,为保证正常啮合,要同时保证蜗杆副两轴线间的距离精度、垂直精度、蜗杆轴线与蜗轮中间平面的重合精度,这是三个不同位置方向的装配精度,因而需要在三个不同方向上分别建立尺寸链。

7.2.3 装配尺寸链的计算方法

装配尺寸链的计算方法与装配方法密切相关。对于同一项装配精度,采用不同装配方法时,其装配尺寸链的计算方法也不相同。

装配尺寸链的计算可分为正计算和反计算。

已知与装配精度有关的各零部件的基本尺寸及其偏差,求解封闭环的基本尺寸及偏差的计算过程,称为正计算;已知封闭环的基本尺寸及偏差,求解与该项装配精度有关的各零部件基本尺寸及偏差的计算过程称为反计算。正计算用于对已设计的图样进行校核验证;反计算主要用于产品设计过程中,以确定各零部件的尺寸和加工精度。

装配尺寸链的计算方法有极值法和概率法两种。

极值法是根据装配精度的要求,在极大、极小的极端情况下,推导出封闭环与组成环之间的相互关系的方法。极值法的优点是简单可靠,但在已知封闭环的情况下,计算得到的组成环公差过于严格。特别是当封闭环精度要求高时,组成环数目较多时,组成环公差可能无法采用机械加工来保证。

同极值法相反,概率法面向一批零件中加工尺寸处于公差带范围的中间部分的零件。实际上,对于一批零件而言,这些零件占大多数,处于极限尺寸的只是极少数。而且一批零件装配,尤其是多环尺寸链装配时,同一部件的各组成环恰好都处于极限尺寸的情况就更少见。因此,在成批或大量生产中,当装配精度要求高且组成环数目又较多时,可采用概率法解算尺寸链,以扩大零件的制造公差,降低制造成本。

考虑到各组成环同时以极值出现的几率很小,利用概率论原理来进行尺寸链计算,将比极值法更合理。

7.3 保证装配精度的方法

机械产品的精度要求最终是靠装配实现的。在设计装配体结构时,就应当考虑到采用什么装配方法,因为装配方法直接影响装配尺寸链的解法、装配工作组织、零件加工精度、产品的成本。根据产品的性能要求、结构特点和生产类型、生产条件,可采用不同的装配方法。保证产品装配精度的方法有互换法、分组法、修配法和调整法。

采用合理的装配方法,实现用较低的零件加工精度达到较高的产品装配精度,这是装配工艺的核心问题。

7.3.1 互换装配法

互换装配法是在装配过程中,零件互换后仍能达到装配精度要求的装配方法。产品采用互换装配法时,装配精度主要取决于零件的加工精度。互换法的实质就是控制零件的加工误差来保证产品的装配精度。

根据零件的互换程度的不同,互换法又分为完全互换法和大数互换法。

1. 完全互换法

在全部产品中,装配时各组成环无须挑选或改变其大小或位置,装配后即能达到装配精度的要求,这种装配方法称为完全互换法。

这种装配方法的特点是:装配质量稳定可靠,对装配工人的技术等级要求较低,装配工作简单、经济、生产率高,便于组织流水装配和自动化装配,又可保证零、部件的互换性,便于组织专业化生产和协作生产。但是,当封闭环要求较严和组成环数目较多时,会提高零件的精度要求,使加工困难。因此,只要各组成环的加工在技术上有可能,且经济上合理时,应该尽量优先采用完全互换装配法。完全互换法主要用于精度高、环数少的尺寸链或精度低、环数多的尺寸链的大批大量装配生产中。例如,装配大批、大量生产汽车、拖拉机、缝纫机和自行车等产品时,大多采用完全互换法。

采用完全互换法装配时,装配尺寸链采用极值公差公式计算(与第1章中工艺尺寸链的计算公式完全相同)。尺寸链各组成环公差之和应小于或等于封闭环公差(即装配精度要求):

$$T_0 \geq \sum_{i=1}^m |\xi_i| T_i \quad (7-1)$$

对于直线尺寸链有:

$$T_0 \geq \sum_{i=1}^m T_i = T_1 + T_2 + \cdots + T_m \quad (7-2)$$

在进行尺寸链反计算时,即已知封闭环(装配精度)的公差 T_0 ,分配有关零件(各组成环)公差 T_i 时,可按“等公差”原则($T_1=T_2=\cdots=T_m=T_{avL}$)先确定它们的平均极值公差 T_{avL} :

$$T_{avL} = \frac{T_0}{\sum_{i=1}^m |\xi_i|} \quad (7-3)$$

对于直线尺寸链有:

$$T_{avL} = T_0 / m \quad (7-4)$$

然后根据各组成环尺寸的大小和加工的难易,对各组成环的公差进行适当的调整。在调整中可参照下列原则:

(1) 组成环是标准件尺寸(如轴承环或弹性挡圈的厚度等)时,其公差值及其分布在相应标准中已有规定,为一定值。

(2) 组成环是几个尺寸链的公共环时,其公差值及其分布由对其要求最严的尺寸链先行确定,对其余尺寸链则为一定值。

(3) 尺寸相近、加工方法相同的组成环,其公差值取相等数值。

(4) 难加工或难测量的组成环,其公差可取较大数值;易加工、易测量的组成环,其公差

取较小值。

(5) 确定好各组成环的公差后,按“入体原则”确定极限偏差,属于外尺寸(如轴)的组成环按基轴制决定其极限偏差;属于内尺寸(如孔)的组成环按基孔制决定其极限偏差。孔中心距的尺寸极限偏差按对称分布选取。注意尽可能使各组成环的公差大小和分布位置符合《公差与配合》国家标准的规定,这样可给生产组织工作带来一定的好处。

显然,当各组成环都按上述原则确定其公差时,按公式计算的公差累积值常不符合封闭环的要求。因此就需选取一个组成环,其公差及其分布需经计算后确定,以便与其他组成环相协调,最后满足封闭环精度要求,这个事先选定的在尺寸链中起协调作用的组成环称为协调环。一般不能选取标准件或公共环作为协调环,因为其公差和极限偏差是一定值。可选择易于加工的零件作为协调环,而将难于加工的零件尺寸公差从宽选取,也可选择难于加工的零件作为协调环,而将易于加工的零件的尺寸公差从严选取。

除采用上述等公差法以外,还有“等精度”法,该法使各组成环都按同一精度等级制造,由此求出平均公差等级系数,再按尺寸查出各组成环的公差值,最后仍需适当调整各组成环的公差。由于等精度法计算比较复杂,计算后仍要调整,故用得不多。

【例 7-1】 如图 7-17 (a) 所示装配关系,轴是固定不动的,齿轮在轴上回转,要求保证齿轮与挡圈之间的轴向间隙为 $0.1 \sim 0.35\text{mm}$ 。已知: $A_1=30\text{mm}$, $A_2=5\text{mm}$, $A_3=43\text{mm}$, $A_4=3 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix} \text{mm}$ (标准件), $A_5=5\text{mm}$ 。现采用完全互换法装配,试确定各组成环公差和极限偏差。

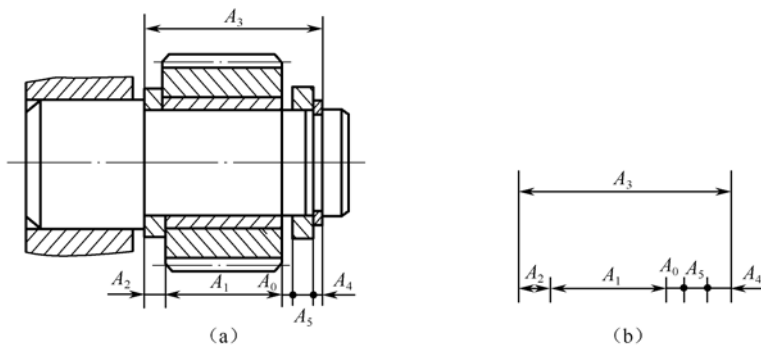


图 7-17 齿轮与轴的装配关系

解 (1) 画装配尺寸链图,校验各环基本尺寸。依题意,轴向间隙为 $0.1 \sim 0.35\text{mm}$,则封闭环 $A_0=0 \begin{smallmatrix} +0.35 \\ +0.01 \end{smallmatrix} \text{mm}$,封闭环公差 $T_0=0.25\text{mm}$,本尺寸链共有 5 个组成环,故 $m=5$,其中 A_3 为增环, A_1 、 A_2 、 A_4 、 A_5 为减环。装配尺寸链如图 7-17 (b) 所示。

由尺寸链计算公式得封闭环基本尺寸为

$$A_0=A_3-(A_1+A_2+A_4+A_5)=43-(30+5+3+5)=0\text{mm}$$

由计算可知,各组成环基本尺寸无误。

(2) 确定各组成环公差和极限偏差。计算各组成环平均极值公差:

$$T_{\text{avL}}=T_0/m=0.25/5=0.05\text{mm}$$

根据各组成环基本尺寸大小与零件加工难易程度,以平均极值公差为基础,确定各组成环极值公差。

A_5 为一垫片,其加工、测量都较为方便,故选择 A_5 作为协调环。由于 A_4 为标准件,其公差与极限偏差为一定值,即 $A_4=3 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix} \text{mm}$, $T_4=0.05$ 。其余各组成环根据其尺寸大小和加工难易

程度分别确定极值公差为: $T_1=0.06\text{mm}$, $T_2=0.04\text{mm}$, $T_3=0.07\text{mm}$, 各组成环公差约为 IT9。

A_1 、 A_2 为外尺寸, A_3 为内尺寸, 按“入体原则”标注为: $A_1=30_{-0.06}^0$, $A_2=5_{-0.04}^0$, $A_3=43_{+0.07}^0$ 。
封闭环的中间偏差为

$$\Delta_0 = \frac{ES_0 + EI_0}{2} = \frac{0.35 + 0.10}{2} = 0.225\text{mm}$$

各组成环的中间偏差分别为

$$\Delta_1 = -0.03\text{mm}, \Delta_2 = -0.02\text{mm}, \Delta_3 = 0.035\text{mm}, \Delta_4 = -0.025\text{mm}$$

(3) 计算协调环极值公差和极限偏差。

协调环 A_5 的下偏差为

$$\begin{aligned} EI(A_5) &= ES(A_3) - [EI(A_1) + EI(A_2) + EI(A_4)] - ES(A_0) \\ &= 0.07 - (-0.06 - 0.04 - 0.05) - 0.35 = -0.13\text{mm} \end{aligned}$$

协调环 A_5 的上偏差为

$$\begin{aligned} ES(A_5) &= EI(A_3) - [ES(A_1) + ES(A_2) + ES(A_4)] - EI(A_0) \\ &= 0 - (0 + 0 + 0) - 0.1 = -0.1\text{mm} \end{aligned}$$

所以协调环 A_5 的尺寸和极限偏差为

$$A_5 = 5_{-0.13}^{-0.10}$$

最后可得各组成环尺寸和极限偏差为

$$A_1 = 30_{-0.06}^0, A_2 = 5_{-0.04}^0, A_3 = 43_{+0.07}^0, A_4 = 3_{-0.05}^0, A_5 = 5_{-0.13}^{-0.10}$$

2. 大数互换装配法

完全互换法的装配过程虽然简单, 但它是根据极大极小的极端情况来建立封闭环与组成环的关系式, 在封闭环为既定值时, 各组成环所获公差过于严格, 常使零件加工过程产生困难。由数理统计基本原理可知: 首先, 在一个稳定的工艺系统中进行大批大量加工时, 零件加工误差出现极值的可能性很小。其次, 在装配时, 各零件的误差同时为极大、极小的“极值组合”的可能性更小。在组成环数多、各环公差较大的情况下, 装配时零件出现“极值组合”的机会就更加微小, 实际上可以忽视不计。这样, 完全互换法用严格零件加工精度的代价换取装配时不发生或极少出现的极端情况, 显然是不科学、不经济的。

在绝大多数产品中, 装配时各组成环无须挑选或改变其大小或位置, 装配后即能达到装配精度的要求, 但少数产品有出现废品的可能性, 这种装配方法称为大数互换法(或部分互换法)。

这种装配方法的特点是: 零件所规定的公差比完全互换法所规定的公差大, 有利于零件的经济加工, 装配过程与完全互换法一样简单、方便。但在装配时, 应采取适当工艺措施, 以便排除个别产品因超出公差而产生废品的可能性, 这种装配方法适用于大批大量生产、组成环较多、装配精度要求又较高的场合。

采用大数互换法装配时, 装配尺寸链采用统计公差公式计算。

对于直线尺寸链, 当尺寸链各组成环均为正态分布时, 其封闭环也属于正态分布。此时:

$$T_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^m T_i^2} \quad (7-5)$$

若尺寸链为非直线尺寸链，且各组成环的尺寸分布为非正态分布时，式（7-5）适用范围可扩大为一般情况，但需引入传递系数 ξ_i 和相对分布系数 k_i 。封闭环的统计公差 T_{0s} 与各组成环公差 T_i 的关系为

$$T_{0s} = \frac{1}{k_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m \xi_i^2 k_i^2 T_i^2} \tag{7-6}$$

对于直线尺寸链，则

$$T_{0s} = \frac{1}{k_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2 T_i^2} \tag{7-7}$$

如果取各组成环公差相等，则各组成环平均统计公差为

$$T_{avs} = \frac{k_0 T_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \xi_i^2 k_i^2}} \tag{7-8}$$

对于直线尺寸链，则

$$T_{avs} = \frac{k_0 T_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2}} \tag{7-9}$$

上述式中，封闭环的相对分布系数 k_0 也表示大数互换法的置信水平 P ，当组成环尺寸呈正态分布时，封闭环也属于正态分布，此时相对分布系数 $k_0=1$ ，置信水平 $P=99.73\%$ ，产品装配后不合格率为 0.27% 。在某些生产条件下，要求适当放大组成环公差或组成环为非正态分布时，置信水平 P 则降低，装配产品不合格率则大于 0.27% ， P 与 k_0 的对应关系见表 7-1。

表 7-1 P 与 k_0 的对应关系

置信水平 P (%)	99.73	99.5	99	98	95	90
封闭环相对分布系数 k_0	1	1.06	1.16	1.29	1.52	1.82

组成环尺寸为不同分布形式时，对应不同的相对分布系数 k 可查表 1-19。

当各组成环具有相同的非正态分布时，且各组成环分布范围相差又不太大时，只要组成环数不太小（ $m \geq 5$ ），封闭环也趋近正态分布。此时， $k_0=1$ ， $k_i=k$ ，则封闭环当量公差 T_{0e} 为统计公差 T_{0s} 的近似值：

$$T_{0e} = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \xi_i^2 T_i^2} \tag{7-10}$$

此时各组成环平均当量公差为

$$T_{ave} = \frac{T_0}{k \sqrt{\sum_{i=1}^m \xi_i^2}} \tag{7-11}$$

对于直线尺寸链，则

$$T_{0e}=k\sqrt{\sum_{i=1}^mT_i^2}\tag{7-12}$$

$$T_{\text{ave}}=\frac{T_0}{k\sqrt{m}}\tag{7-13}$$

当各组成环在其公差内呈正态分布时，封闭环也呈正态分布。此时， $k_0=k_i=1$ ，则封闭环平方公差为

$$T_{0q}=\sqrt{\sum_{i=1}^m\xi_i^2T_i^2}\tag{7-14}$$

各组成环平均平方公差为

$$T_{\text{avq}}=\frac{T_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^m\xi_i^2}}\tag{7-15}$$

对于直线尺寸链，则

$$T_{0q}=\sqrt{\sum_{i=1}^mT_i^2}\tag{7-16}$$

$$T_{\text{avq}}=\frac{T_0}{\sqrt{m}}\tag{7-17}$$

在本章中，主要介绍直线装配尺寸链的计算方法，所采用的计算公式见表 7-2。

表 7-2 直线装配尺寸链计算公式

序 号	计 算 内 容	计 算 公 式	说 明
1	封闭环基本尺寸	$A_0=\sum_{i=1}^m\xi_iA_i$	$ \xi_i =1$
2	封闭环中间偏差	$\Delta_0=\sum_{i=1}^m\xi_i(\Delta_i+e_i\frac{T_i}{2})$	$e_i\neq0$ 各组成环尺寸为非对称分布
		$\Delta_0=\sum_{i=1}^m\xi_i\Delta_i$	$e_i=0$ 各组成环尺寸为对称分布
3	封闭环极限偏差	$ES_0=\Delta_0+T_0/2$	各种装配方法
		$EI_0=\Delta_0-T_0/2$	
4	封闭环极限尺寸	$A_{0\max}=A_0+ES_0$	
		$A_{0\min}=A_0+EI_0$	

续表

序 号	计 算 内 容		计 算 公 式	说 明		
5	封 闭 环 公 差	极值公差	$T_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^m T_i^2}$	除大数互换法以外任何装配方法		
		统 计 公 差	$T_{0s} = \frac{1}{k_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2 T_i^2}$	$k_0 \neq 1, k_i \neq 1$, 组成环和 封闭环尺寸均非正态分布	$T_{0e}=T_{0s}$ 给定组成环时 $T_0>T_{0s}>T_{0q}$ 大数互换法	
			当量公差	$T_{0e} = k \sqrt{\sum_{i=1}^m T_i^2}$		$k_0=1, k_i=k$, 组成环尺寸 分布曲线相同, 封闭环尺寸 正态分布
			平方公差	$T_{0q} = \sqrt{\sum_{i=1}^m T_i^2}$		$k_0=k_i=1$, 组成环和封闭环 尺寸呈正态分布
6	组 成 环 平 均 公 差	平均极值公差	$T_{av} = \frac{T_0}{m}$	除大数互换法以外任何装配方法		
		统 计 公 差	$T_{avS} = \frac{k_0 T_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^m k_i^2}}$	$k_0 \neq 1, k_i \neq 1$, 组成环和 封闭环尺寸均非正态分布	$T_{av}=T_{avS}$ 给定组成环时 $T_{av}<T_{avS}<T_{avq}$ 大数互换法	
			平均当量公差	$T_{ave} = \frac{T_0}{k\sqrt{m}}$		$k_0=1, k_i=k$, 组成环尺寸 分布曲线相同, 封闭环尺寸 正态分布
			平均平方公差	$T_{avq} = \frac{T_0}{\sqrt{m}}$		$k_0=k_i=1$, 组成环和封闭环 尺寸呈正态分布
7	组成环极限偏差		$ES_i=\Delta_i+T_i/2$	各种装配方法		
		$EI_i=\Delta_i-T_i/2$				
8	组成环极限尺寸		$A_{imax}=A_i+ES_i$			
			$A_{imin}=A_i+EI_i$			

为了便于比较，本章中多采用图 7-17 所示装配关系为例加以说明。

【例 7-2】 如图 7-17 (a) 所示装配，已知 $A_1=30\text{mm}$ ， $A_2=5\text{mm}$ ， $A_3=43\text{mm}$ ， $A_4=3_{-0.05}^0\text{mm}$ (标准件)， $A_5=5\text{mm}$ ，装配后齿轮与垫圈轴向间隙为 $0.1\sim 0.35\text{mm}$ ，现采用大数互换装配，试确定各组成环公差和极限偏差。

解 (1) 画出装配尺寸链图，校验各环基本尺寸与【例 7-1】过程相同。

(2) 确定各组成环公差和极限偏差。

该产品在大批量生产条件下，工艺过程稳定，各组成趋近正态分布， $k_0=k_i=1$ ， $e_0=e_i=0$ ，则各组成环平均平方公差为

$$T_{avq} = \frac{T_0}{\sqrt{m}} = \frac{0.25}{\sqrt{5}}\text{mm} \approx 0.11\text{mm}$$

A_3 为一轴类零件，与其他组成环相比难加工，选 A_3 为协调环。根据各组成环基本尺寸大小与零件加工难易程度，以平均平方差为基础，从严选取各组成环公差： $T_1=0.14\text{mm}$ ； $T_2=T_5=0.08\text{mm}$ ，其公差等级约为 IT11， $A_4=3_{-0.05}^0\text{mm}$ ， $T_4=0.05\text{mm}$ 。由于 A_1 、 A_2 、 A_5 皆为外尺寸，其极限偏差按基轴制确定，则 $A_1=30_{-0.14}^0\text{mm}$ ， $A_2=5_{-0.08}^0\text{mm}$ ， $A_5=5_{-0.08}^0\text{mm}$ ，各环的中间偏

差分别为

$$\Delta_0=0.225\text{mm}, \Delta_1=-0.07\text{mm}, \Delta_2=-0.04\text{mm}, \Delta_4=-0.025\text{mm}; \Delta_5=-0.04\text{mm}$$

(3) 计算协调环公差和极限偏差。

协调环 A_3 的公差:

$$\begin{aligned} T_3 &= \sqrt{T_0^2 - (T_1^2 + T_2^2 + T_4^2 + T_5^2)} \\ &= \sqrt{0.25^2 - (0.14^2 + 0.08^2 + 0.05^2 + 0.08^2)} \approx 0.16 (\text{只舍不进}) \end{aligned}$$

协调环 A_3 的中间偏差为

$$\Delta_3 = \Delta_0 + (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_4 + \Delta_5) = 0.225 + (-0.07 - 0.04 - 0.025 - 0.04) = 0.05\text{mm}$$

$$\text{协调环的 } A_3 \text{ 的极限偏差为: } ES_3 = \Delta_3 + \frac{1}{2} T_3 = 0.05 + \frac{1}{2} \times 0.16 = 0.13$$

$$EI_3 = \Delta_3 - \frac{1}{2} T_3 = 0.05 - \frac{1}{2} \times 0.16 = -0.03$$

故 $A_3 = 43 \begin{smallmatrix} +0.13 \\ -0.03 \end{smallmatrix} \text{mm}$

最后可得各组成环尺寸为

$$A_1 = 30 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.14 \end{smallmatrix} \text{mm}, A_2 = 5 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.08 \end{smallmatrix} \text{mm}, A_3 = 43 \begin{smallmatrix} +0.13 \\ -0.03 \end{smallmatrix} \text{mm}, A_4 = 3 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix} \text{mm}, A_5 = 5 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.08 \end{smallmatrix} \text{mm}。$$

显然采用大数互换装配法时,各组成环公差较完全互换法时有较大放大,但仍能保证相同装配精度。为了比较在组成环尺寸相同的条件下,完全互换装配法和大数互换装配法装配精度的差别,现采用【例 7-1】计算结果为已知条件进行正计算,求解采用大数互换装配法所获的封闭环公差及其分布。

【例 7-3】 装配关系如图 7-17 (a) 所示,已知 $A_1 = 30 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.06 \end{smallmatrix} \text{mm}$, $A_2 = 5 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.04 \end{smallmatrix} \text{mm}$, $A_3 = 43 \begin{smallmatrix} +0.07 \\ 0 \end{smallmatrix} \text{mm}$, $A_4 = 3 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix} \text{mm}$, $A_5 = 5 \begin{smallmatrix} -0.10 \\ -0.13 \end{smallmatrix} \text{mm}$, 现采用大数互换法装配,求封闭环公差及其分布。

解 (1) 封闭环基本尺寸:

$$A_0 = A_3 - (A_1 + A_2 + A_4 + A_5) = 43 - (30 + 5 + 3 + 5) = 0$$

(2) 封闭环平方公差:

$$\begin{aligned} T_{0q} &= \sqrt{\sum_{i=1}^m \xi_i^2 T_i^2} = \sqrt{\sum_i T_i^2} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + T_4^2 + T_5^2} \\ &= \sqrt{0.06^2 + 0.04^2 + 0.07^2 + 0.05^2 + 0.03^2} \approx 0.116\text{mm} \end{aligned}$$

(3) 封闭环中间偏差:

$$\Delta_0 = \sum_{i=1}^m \xi_i \Delta_i = \Delta_3 - (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_4 + \Delta_5) = 0.035 - (-0.03 - 0.02 - 0.025 - 0.115) = 0.225\text{mm}$$

$$(4) \text{ 封闭环上偏差: } ES_0 = \Delta_0 + \frac{1}{2} T_0 = 0.225 + \frac{1}{2} \times 0.116 = 0.283\text{mm}$$

$$(5) \text{ 封闭环下偏差: } EI_0 = \Delta_0 - \frac{1}{2} T_0 = 0.225 - \frac{1}{2} \times 0.116 = 0.167\text{mm}$$

即封闭环 $A_0 = 0 \begin{smallmatrix} +0.283 \\ +0.167 \end{smallmatrix} \text{mm}$ 。

比较【例 7-1】与【例 7-3】的计算结果可知:在装配尺寸链中,当各组成环基本尺寸、公

差及其极限偏差固定不变的条件下,采用极值公差公式(用于完全互换装配法)计算的封闭环公差 $T_{0l}=0.25\text{mm}$,采用统计公差公式(用于大数互换法公式)计算的封闭环平方差 $T_{0q}=0.116\text{mm}$,显然, $T_{0l}>T_{0q}$ 。但是 T_{0l} 包括了装配中封闭环所能出现的一切尺寸,取 T_{0l} 装配精度时所有装配结果是合格的,即封闭环尺寸出现在 T_{0l} 范围内的概率为 100%。而当 T_{0q} 在正态分布下的取值 $6\sigma_0$ 时,装配结果尺寸出现在 T_{0q} 范围内的概率为 99.73%,仅有 0.27% 的装配结果超出 T_{0q} 。即如果取 T_{0q} 为装配精度,仅有 0.27% 的产品为废品,如图 7-18 所示。但采用大数互换装配法时,各组成环公差远大于完全互换装配法时各组成环的公差,其组成环平均公差将扩大 \sqrt{m} 倍,各加工零件精度下降,加工成本有所降低。

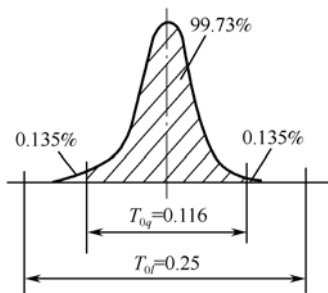


图 7-18 大数互换法与完全互换法的比较

7.3.2 分组装配法

分组装配法又称选择装配法,它是指将尺寸链中组成环的公差放大到经济可行的程度,然后选择合适的零件进行装配,以保证装配精度的要求。这种装配方法常用于装配精度要求很高而组成环数又极少的成批或大量生产中。

选择装配法按其形式不同有直接选配法、分组选配法和复合选配法三种。

1. 直接选配法

在装配时,由工人从许多待装配的零件中,凭经验直接选择合适的零件进行装配,以保证装配精度的要求。

这种装配方法的优点是零件不必事先分组,能达到很高的装配精度。缺点是装配工人凭经验挑选合适零件通过试凑进行装配,所以装配时间不易准确控制,装配精度很大程度上取决于工人的技术水平。这种装配方法不宜用于生产节拍要求严格的大批大量流水作业中。

另外,采用直接选配法装配,一批零件严格按同一精度要求装配时,最后可能出现无法满足要求的“剩余零件”,当各零件加工误差分布规律不同时,“剩余零件”可能更多。

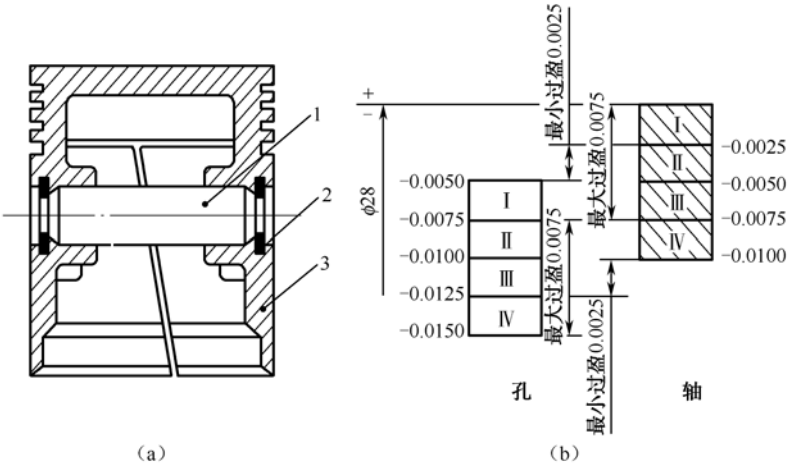
2. 分组选配法

这种方法是将组成环的公差相对于完全互换法所求之值增大若干倍,使其尺寸能按经济精度加工,然后根据测量结果将各组成环按其实际尺寸大小分为若干组,各对应组进行装配,以达到装配精度要求。由于同组零件具有互换性,所以这种方法又称为分组互换法。

分组选配法在大批大量生产中可降低对组成环的加工要求,而不降低装配精度。但是,分组装配法增加了零件测量、分组和配套工作。当组成环较多时,这种工作就会变得非常复杂。所以,分组选配法适用于大批量生产中组成环数少而装配精度要求高的部件装配,如滚动轴承的装配、内燃机活塞和缸套的装配、活塞与活塞销的装配以及精密机床中某些精密部件的装配等。分组选配法通常采用极值公差公式计算。

现以汽车发动机中活塞销与活塞销孔的装配为例,说明分组选配的原理和选配过程。

如图 7-19 (a) 所示为活塞销与活塞的装配关系, 其中销径为 $d=28\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.0025 \end{smallmatrix}$ mm, 孔径为 $D=28\begin{smallmatrix} -0.0050 \\ -0.0075 \end{smallmatrix}$ mm。装配技术要求规定, 活塞销与活塞销孔在冷态装配时应有 0.0025~0.0075mm 的过盈量, 即最大过盈量 Y_{\max} 和最小过盈量 Y_{\min} 分别为 0.0075mm 和 0.0025mm。因此, 封闭环的公差为 $T_0=|Y_{\max}-Y_{\min}|=|0.0075-0.0025|=0.0050$ mm, 若采用完全互换法装配, 则销与销孔的平均极值公差为 0.0025mm (基本尺寸为 28mm, 其公差等级为 IT2), 显然制造这样精度的销与销孔既困难又不经济。因此, 在实际生产中, 采用分组装配法, 可将销与销孔的公差在同方向都放大四倍 (采取上偏差不动, 变动下偏差) 由 0.0025mm 放大到 0.01mm, 即销径和孔径转变为 $d=28\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.01 \end{smallmatrix}$ mm, $D=28\begin{smallmatrix} -0.005 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$ mm。这样, 活塞销可用无心磨床加工, 活塞销孔可用金刚镗床加工。然后, 用精密量具测量其尺寸, 并按尺寸大小分成四组, 涂上不同颜色加以区别, 或装入不同的容器内, 并按对应组进行装配, 即大的活塞销配大的活塞销孔, 小的活塞销配小的活塞销孔, 装配后仍能保证过盈量的要求。具体分组情况如图 7-19 (b) 和表 7-3 所示。



1—活塞销; 2—挡圈; 3—活塞

图 7-19 某活塞销与活塞的装配关系图

表 7-3 活塞销与活塞销孔直径分组 (单位: mm)

组别	标志颜色	活塞销直径 $d=\phi 28\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.010 \end{smallmatrix}$	活塞销孔直径 $D=\phi 28\begin{smallmatrix} -0.005 \\ -0.015 \end{smallmatrix}$	配合情况	
				最小过盈	最大过盈
I	红	$\phi 28\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.0025 \end{smallmatrix}$	$\phi 28\begin{smallmatrix} -0.0050 \\ -0.0075 \end{smallmatrix}$	0.0025	0.0075
II	白	$\phi 28\begin{smallmatrix} -0.0025 \\ -0.0050 \end{smallmatrix}$	$\phi 28\begin{smallmatrix} -0.0075 \\ -0.0100 \end{smallmatrix}$		
III	黄	$\phi 28\begin{smallmatrix} -0.0050 \\ -0.0075 \end{smallmatrix}$	$\phi 28\begin{smallmatrix} -0.0100 \\ -0.0125 \end{smallmatrix}$		
IV	绿	$\phi 28\begin{smallmatrix} -0.0075 \\ -0.0100 \end{smallmatrix}$	$\phi 28\begin{smallmatrix} -0.0125 \\ -0.0150 \end{smallmatrix}$		

分组装配法应满足以下条件:

- (1) 为保证分组后各组的配合性质及配合精度与原来的要求相同, 配合件的公差应相等, 公差增大时要同方向增大, 增大的倍数应等于以后的分组数。
当配合件公差不等时, 采用分组装配法将改变配合性质, 因此生产中应用不多。
- (2) 为保证零件分组后在装配时各组数量相匹配, 应使配合件的尺寸分布曲线一致 (如正

态分布), 如果分布曲线不一致, 将导致各组相配零件数量不等, 造成一些零件积压浪费, 这种情况在生产中往往是难以避免的。如图 7-20 所示, 图中第一组与第四组的轴与孔零件数量相差较大, 实际生产中, 常常在聚集相当数量的不配套零件后, 专门加工一批零件与剩余零件相配, 以解决零件剩余问题。

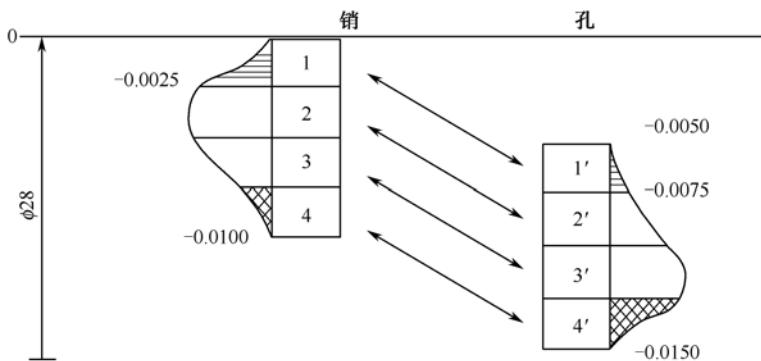


图 7-20 活塞销与活塞销孔的各组数量不等

(3) 分组数不宜过多, 零件尺寸公差只要放大到经济可行即可, 以免增加零件的测量、分类、保管工作量, 使生产组织工作复杂, 甚至造成生产过程混乱。

(4) 配合件的表面粗糙度、相互位置精度和形状精度必须保持原设计要求, 不能随公差的大幅放大而降低粗糙度要求和放大形位公差, 否则, 不能达到要求的配合精度及配合质量。

3. 复合选配法

该法是分组装配与直接选配的复合形式。它是指将组成环的公差相对互换法所求之值增大, 零件加工后预先测量、分组、装配时, 工人还在各对应组内进行选择装配。因而, 这种方法吸取了前两种的优点, 既能提高装配精度, 又不必过多增加分组数。但是, 装配精度仍然要依赖工人的技术水平, 工时也不稳定。这种方法常用于配合件公差不同时, 作为分组装配法的一种补充形式。例如, 发动机中的汽缸与活塞的装配多采用这种方法。

7.3.3 修配装配法

在装配精度要求高且组成环又较多的单件小批生产或成批生产中, 常用修配法装配。修配法是用钳工或机械加工的方法修整产品中某个零件(该零件称为修配件, 该组成环称为修配环)的尺寸, 以获得规定装配精度的一种方法, 而其他有关零件仍可以按照经济加工精度进行加工。

作为解尺寸链的一种方法, 修配法就是修配尺寸链中修配环的尺寸, 补偿其他组成环的累积误差, 以保证装配精度的要求。因此, 修配环也可称为补偿环。通常所选择的补偿环应是形状简单、便于装拆、易于修配, 并且对其他装配尺寸链没有影响的零件。

修配法的优点是能利用较低的制造精度来获得很高的装配精度, 但修配劳动量大, 对工人技术水平要求高, 不便于组织流水作业。常用的修配法有单件修配法、合并加工修配法和自身加工修配法 3 种。

1. 修配装配法的种类

1) 单件修配法

单件修配法是选定某一固定零件为修配件,在装配时进行修配以保证装配精度的方法。例如,在图 7-10 中车床尾座底板的修配是为保证前后顶尖的等高度;应用广泛的平键的修配是为保证其与键槽的配合间隙。这种修配方法在生产中应用最广。

2) 合并加工修配法

将两个或多个零件预先装配在一起进行加工修配,这就是合并加工修配法。这些零件组成的尺寸作为一个组成环,这样就减少组成环的数目,相应地也减少了修配工作量。但由于零件合并后再进行加工和装配,给组织生产带来了一定不便,所以多用于单件小批生产中。如在图 7-10 中进行尾座装配时,也可采用合并加工修配法,即先将加工好的尾座体 2 和尾座底板 3 两个零件装配为一体,再以尾座底板的底平面为定位基准,镗削加工尾座顶尖套锥孔,这样组成环 A_2 和 A_3 就合并为一个组成环 $A_{2,3}$,此环公差可放大,并且可以给尾座底板的底平面留较小的刮研量,使整个装配工作变得更加简单。

3) 自身加工修配法

对于某些装配精度要求很高的产品或部件,若单纯依靠限制各个零件的加工误差来保证,势必要求各个零件具有很高的加工精度,甚至无法加工,而且不易选择一个适当的修配件。此时,可采用自己加工自己的方法来保证装配精度,这就是自身加工修配法。例如,牛头刨床总装后,可用自刨的方法加工工作台面,使滑枕与工作台面平行;平面磨床装配时,自己磨自己的工作台面,以保证工作台面与砂轮轴平行。

2. 修配法装配尺寸链的计算

所谓修配装配法,就是各组成环都按经济加工精度制造,在组成环中选一修配环预先留有修配量,装配时通过修刮修配环的尺寸来达到装配要求。因此,解修配法装配尺寸链的关键在于:确定修前修配环的尺寸,验算修配量是否合适。修配装配法适用于单件或成批生产中那些精度要求高,且组成环数目较多的部件的装配,通常采用极值公差公式计算,也可采用概率法公式计算。

确定修配环时,要考虑以下几点:

- (1) 所选修配环装卸方便、修配面积小、结构简单、易于修配;
- (2) 所选修配环不应为公共环;
- (3) 不能选择进行表面处理的零件作为修配环。

修配环尺寸确定时,应考虑使其修配量足够和最小,因为修配工作一般都是通过后续加工(如锉、刮、研等)来去除修配环零件表面上多余的金属层,从而满足装配精度要求。若修配量不够,则不能满足要求;修配量过大,又会使劳动量增大,工时难以确定,降低了生产率。由于所选修配环可能为增环或减环,而增环和减环的修配表面各有两个,所以共有四种情况,可将这四种情况中归纳为两种:一是加工修配环时使封闭环尺寸减少,即封闭环越修越小;二是加工修配环时使封闭环尺寸增大,即封闭环越修越大。下面分别讨论。

1) 修配环被修配后使封闭环尺寸变小

设原设计要求的装配精度为 $A_0^{T_{A_0}}$,最大最小尺寸为 $A_{0\max}$ 、 $A_{0\min}$ 。当各组成环按经济加工精

度标注公差后, 封闭环的公差变为 TA'_0 , 极值尺寸变为 $A'_{0\max}$ 、 $A'_{0\min}$, 如图 7-21 所示, 可见在 $O-O$ 线下面 (即 OB 段内的) 的一部分修配环已无法修配, 因为封闭环越修越小; 即在修配前, 尺寸链的封闭环尺寸已经小于原设计要求的最大尺寸 $A_{0\max}$ 。为了保证所有的修配环尺寸都能进行修配, 此时必须改变修配环的基本尺寸 (修配环为增环时增加修配环基本尺寸, 修配环为减环时减少修配环基本尺寸), 使 $A'_{0\min} \geq A_{0\min}$ 。由于修配环在装配时要进行最终加工, 如果不修配或修配时修配量过小, 就不能保证被修配表面的质量, 影响装配精度。因此, 还必须使修配环有一个最小修配量, 设最小修配量为 K_{\min} , 可通过改变修配环的基本尺寸 (改变方法同上) 来保证, 此时, 使封闭环尺寸变为

$$A''_{0\min} = A_{0\min} + K_{\min} \quad (7-18)$$

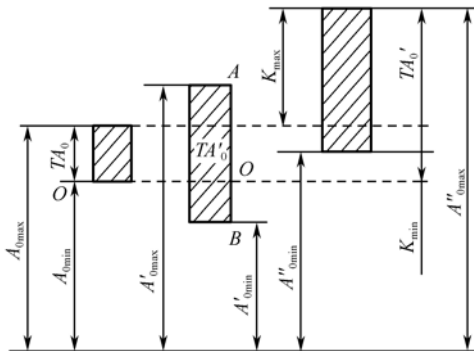


图 7-21 修配环被修配后封闭环尺寸变小时封闭环的公差带要求值与实际公差带相对关系

这时在解尺寸链时, 各组成环可按经济加工精度取相应的公差, 然后按“入体原则”标注除修配环外的各组成环上下偏差, 修配环的尺寸可按式 (7-18) 求得: 设修配前修配环基本尺寸为 A_K , 当修配环为增环时, 由极值法可求出修配前修配环的最小尺寸 $A_{K\min}$ (由极值法计算公式进行计算); 当修配环为减环时, 由极值法可求出修配前修配环的最大尺寸 $A_{K\max}$ 。此时最大修配量由图 7-21 所示得:

$$K_{\max} = K_{\min} + (TA'_0 - TA_0) \quad (7-19)$$

2) 修配环被修配后使封闭环尺寸变大

设原设计要求的装配精度为 TA_0 , 最大、最小尺寸为 $A_{0\max}$ 、 $A_{0\min}$ 。当各组成环按经济加工精度标注公差后, 封闭环的尺寸变为 TA'_0 , 极值尺寸变为 $A'_{0\max}$ 、 $A'_{0\min}$, 如图 7-22 所示, 可见在 $O-O$ 线上面的 (即 OA 段内的) 修配环已无法修配, 因封闭环越修越大; 即在没有修配时, 封闭环尺寸已经大于原设计要求的最大尺寸 $A_{0\max}$ 。为了保证所有的修配环尺寸都能进行修配, 此时必须改变修配环的基本尺寸 (修配环为增环时减少修配环基本尺寸, 为减环时增大修配环基本尺寸), 使 $A'_{0\max} \leq A_{0\max}$ 。若要求有一个最小修配量, 设最小修配量为 K_{\min} , 可通过改变修配环的基本尺寸来保证, 此时, 封闭环基本尺寸为

$$A''_{0\max} = A_{0\max} - K_{\min} \quad (7-20)$$

解尺寸链时, 各组成环可按经济加工精度取相应的公差, 然后按“入体原则”标注除修配环外的各组成环上下偏差, 修配环的尺寸可按式 (7-20) 求得。当修配环为增环时, 由极值法可求出修配前修配环的最大尺寸 $A_{K\max}$; 当修配环为减环时, 由极值法可求出修配前修配环的最小尺寸 $A_{K\min}$ 。此时最大修配量由图 7-23 得仍为式 (7-19)。

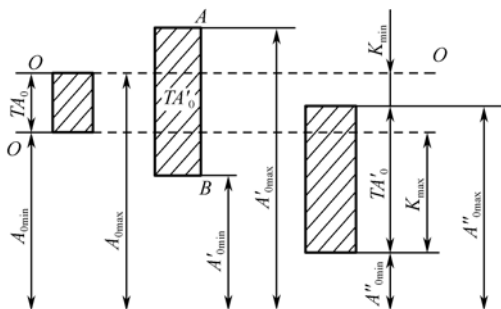


图 7-22 修配环被修配后封闭环尺寸变大时封闭环的公差带要求值与实际公差带相对关系

【例 7-4】 图 7-10 所示卧式车床装配时，要求尾座中心线比主轴中心线高 $0.03 \sim 0.06 \text{ mm}$ 。已知： $A_1=160 \text{ mm}$ ， $A_2=30 \text{ mm}$ ， $A_3=130 \text{ mm}$ 。用修配装配法，确定各组成环公差和极限偏差。

解法一（按上述分析法求解）

(1) 画装配尺寸链图（如图 7-10 (b) 所示），校验各环基本尺寸。 A_1 为减环， A_2 、 A_3 为增环。封闭环尺寸 $A_0=0^{+0.06}_{+0.03} \text{ mm}$ 。

(2) 确定修配环。根据装配体各组成环实际情况，选尾架垫板 A_2 为修配环。

(3) 按经济加工精度确定各组成环公差：

$$TA_1=TA_3=0.1 \text{ mm} \text{（镗模精镗）}, TA_2=0.15 \text{ mm} \text{（半精磨）}$$

(4) 确定各组成环（除修配环外）的上下偏差：

$$A_1=160 \pm 0.05 \text{ mm}, A_3=130 \pm 0.05 \text{ mm}$$

(5) 确定修配环的尺寸。因为修配环为增环且为修配环被修配后封闭环尺寸变小时的情况，根据修配情况，取最小修配量 $K_{\min}=0.1 \text{ mm}$ ，由式 (7-26) 得：

$$A''_{0\min}=A_{0\min}+K_{\min}=0.03+0.1=0.13 \text{ mm}$$

由图 7-10 (b) 所示尺寸链，用极值法解得：

$$A''_{0\min}=A_{2\min}+A_{3\min}-A_{1\max}=A_{2\min}+(130-0.05)-(160+0.05)=0.13 \text{ mm}$$

得 $A_{2\min}=30.23 \text{ mm}$ ，

则 $A_{2\max}=A_{2\min}+TA_2=30.23+0.15=30.38 \text{ mm}$ ，

即 $A_2=30^{+0.38}_{+0.23} \text{ mm}$ 。

解法二（假偏差法）

1. 假偏差修配法装配尺寸链解算方法

1) 修配前修配环尺寸的确定

确定修配前修配环尺寸就是要保证在装配时修配环有一定的修配量，否则在装配时就无法装配；因此，当各组成环的尺寸按照经济加工精度确定后，可以计算出此时修配环的尺寸范围，并根据这个范围来确定修配环的尺寸。因为所选取的修配环在装配尺寸链中可能是增环，也可能是减环。如图 7-23 (a) 所示，若选取增环 A_2 为修配环，当修配 S 面时，会使修配环尺寸越修越小，从而导致封闭环尺寸也随之越修越小；当修配 R 面时，又会使修配环尺寸越修越大，从而导致封闭环尺寸也随之越修越大。如图 7-23 (b) 所示，若选取减环 A_2 为修配环，当修配 S 面时，会使修配环尺寸越修越小，但会导致封闭环尺寸随之越修越大；当修配 R 面时，又会使修配环尺寸越修越大，从而又导致封闭环尺寸越修越小。因此，共有四种不同的情况。经过

详细分析, 所得结果如下。

(1) 修配环尺寸越修越小时。如图 7-23 所示, 选 A_2 为修配环修配 S 面时, 即为修配环尺寸越修越小的情况。当其他各组成环按经济加工精度选取公差后, 根据封闭环要求的尺寸按极值法可计算出 A_2 的值为 $A_{2EI(A_2)}^{ES(A_2)}$ 。

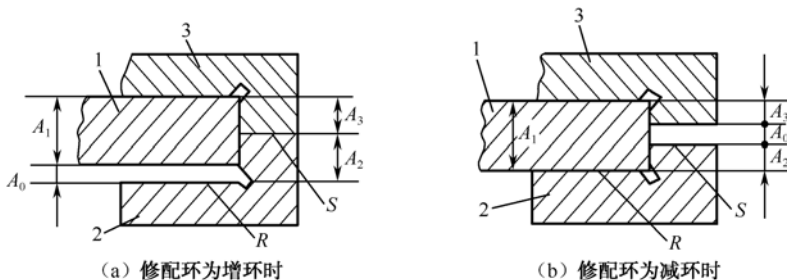


图 7-23 修配环尺寸的确定示意图

此时由于 $ES(A_2) < EI(A_2)$, 这种上偏差小于下偏差的公差称为假偏差。根据这个假偏差, 可以求出修配环的尺寸范围为 $(A_2 + ES(A_2)) \sim (A_2 + EI(A_2))$, 从而可以利用这个范围来确定修配前修配环的尺寸。

① 修配前修配环基本尺寸的确定。由于修配环尺寸越修越小, 所以在修配前修配环尺寸应有足够的修配量, 当其他各组成环按经济加工精度选取公差后, 根据所计算的修配环的值 $A_{2EI(A_2)}^{ES(A_2)}$, 求出修配前修配环的基本尺寸。设此时修配环的基本尺寸为 A_2' , 由于修配环越修越小, 所以应取大值, 即为

$$A_2' = A_2 + EI(A_2)$$

若被修配的表面有表面质量要求或要求被修配的表面有一个最小修配量时, 为了保证所有的修配环尺寸都能进行修配, 修配前修配环的基本尺寸还应再增加一个最小修配量, 设最小修配量为 K_{\min} , 则此时的修配前修配环基本尺寸为 A_2'' :

$$A_2'' = A_2 + EI(A_2) + K_{\min}$$

② 修配前修配环尺寸的公差标注。设修配前修配环的尺寸公差为 TA_2 , 由于此时修配环尺寸越修越小, 所以尺寸公差应向增大修配环尺寸的方向标注, 即为 $(A_2'')_0^{+TA_2}$ 。

(2) 修配环尺寸越修越大时。如图 7-23 所示, 选 A_2 为修配环, 修配 R 面时, 即为修配环尺寸越修越大的情况。同理, 当其他各组成环按经济加工精度选取公差后, 根据封闭环要求的尺寸按极值法可计算出 A_2 的值为 $A_{2EI(A_2)}^{ES(A_2)}$ 。

① 修配前修配环基本尺寸的确定。由于 $ES(A_2) < EI(A_2)$, 修配环的尺寸范围为 $(A_2 + ES(A_2)) \sim (A_2 + EI(A_2))$, 设此时修配前修配环的基本尺寸为 A_2' , 因修配环越修越大, 所以应取小值, 即为

$$A_2' = A_2 + ES(A_2)$$

若要求被修配的表面有一个最小修配量 K_{\min} , 这时修配前修配环的基本尺寸还应再减少一个最小修配量, 设此时修配前修配环的基本尺寸为 A_2'' , 则有

$$A_2'' = A_2 + ES(A_2) - K_{\min}$$

② 修配前修配环尺寸的公差标注。设修配前修配环的尺寸公差为 TA_2 , 由于此时修配环尺寸越修越大, 所以尺寸公差应向减少修配环尺寸的方向标注, 即为 $(A_2'')_0^{-TA_2}$ 。

2) 修配量的验算

用所求的修配前修配环尺寸, 重新求出封闭环尺寸 A'_0 , 然后与原设计所要求的封闭环尺寸比较, 便可求出最大修配量, 最大修配量为

$$K_{\max} = TA'_0 - TA_0 + K_{\min}$$

式中, TA'_0 为用修配前修配尺寸求出的封闭环公差; TA_0 为原设计要求的封闭环公差。

若最大修配量过大, 当修配环越修越小时, 可通过适当减少增环的上偏差或增大减环的下偏差来处理; 当修配环越修越大时, 则可通过适当减少减环上偏差或增大增环的下偏差来处理。

2. 用假偏差法求解【例 7-4】

(1) 画装配尺寸链图 (如图 7-10 (b) 所示), 校验各环基本尺寸。 A_1 为减环, A_2 、 A_3 为增环。封闭环尺寸 $A_0 = 0^{+0.06}_{+0.03}$ mm。

(2) 确定修配环。根据装配体各组成环实际情况, 选尾架垫板 A_2 为修配环。

(3) 按经济加工精度确定各组成环公差:

$$TA_1 = TA_3 = 0.1 \text{ mm (镗模精镗)}, TA_2 = 0.15 \text{ mm (半精磨)}$$

(4) 确定各组成环 (除修配环外) 的上下偏差及修配环的假偏差尺寸:

$$A_1 = 160 \pm 0.05 \text{ mm}, A_3 = 130 \pm 0.05 \text{ mm}$$

由极值法解图 7-10 (b) 所示尺寸链, 得此时修配环尺寸为

$$+0.06 = +0.05 + ES(A_2) - (-0.05), \text{ 得 } ES(A_2) = -0.04 \text{ mm}$$

$$+0.03 = -0.05 + EI(A_2) - (+0.05), \text{ 得 } EI(A_2) = +0.13 \text{ mm}$$

修配环的假偏差尺寸为 $30^{+0.04}_{+0.13}$ mm。

修配环的尺寸范围为 29.96 mm ~ 30.13 mm。

(5) 确定修配前修配环的尺寸。因为修配环为增环且为修配环越修越小的情况, 根据修配情况, 取最小修配量 $K_{\min} = 0.1 \text{ mm}$, 则得修配前修配环的基本尺寸为

$$A_2'' = A_2 + EI(A_2) + K_{\min} = 30 + 0.13 + 0.1 = 30.23 \text{ mm}$$

(6) 标注修配前修配环的公差。由于修配环为越修越小的情况, 尺寸公差应向增大修配环尺寸的方向标注, 即

$$(A_2'')_0^{+TA_2} = 30.23_0^{+0.15} = 30_{+0.23}^{+0.38} \text{ mm}$$

这就是修配前修配环尺寸, 与上述结果相同。

7.3.4 调整装配法

对于精度要求高且组成环数又较多的产品和部件, 在不能用互换法进行装配时, 除了用分组互换和修配法外, 还可用调整法来保证装配精度。在装配时, 通过改变产品中可调整零件的相对位置或选用合适的可调整零件, 以达到装配精度的方法称为调整法。

调整法与修配法的实质相同, 即各零件公差仍然按经济加工精度的原则来确定, 选择一个零件为调整环 (也可称为补偿环, 此环的零件称为调整件), 来补偿其他组成环的累积误差。但两者在改变补偿环尺寸的方法上有所不同: 修配法采用机械加工的方法去除补偿环零件上的金属层; 调整法采用改变补偿环零件的相对位置或更换新的补偿环零件, 以保证装配精度的要求。

1. 调整装配法的种类

常用的调整法有可动调整法、固定调整法和误差抵消调整法三种。

1) 可动调整法

可动调整法是通过改变调整件的相对位置来保证装配精度的方法。如图 7-24 所示为丝杠螺母副调整间隙的机构。当发现丝杠螺母副间隙不合适时,可转动中间螺钉,通过斜楔块的上、下移动来改变间隙的大小。

采用可动调整法可获得很高的装配精度,并且可以在机器使用过程中随时补偿由于磨损、热变形等原因引起的误差,比修配法操作简便,易于实现,在成批生产中应用广泛。

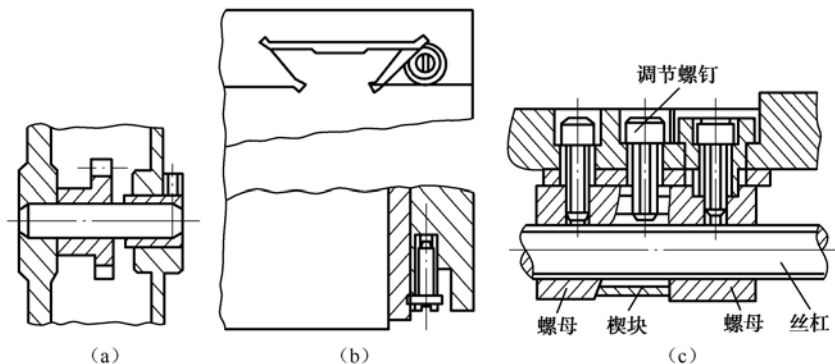


图 7-24 可动调整法的应用

2) 固定调整法

固定调节法是在装配体中选择一个零件作为调整件,根据各组成环所形成的累积误差大小来更换不同的调整件,以保证装配精度的要求。固定调整法多应用于装配精度要求高的大批量生产中。

调整件是按一定尺寸间隙级别预先制成的若干组专门零件,根据装配时的需要,选用其中的某一级别的零件来做补偿误差,常用的调整件有垫圈、垫片、轴套等。

3) 误差抵消调整法

在产品或部件装配时,通过调整有关零件的相互位置,使其加工误差(大小和方向)相互抵消一部分,以提高装配精度的方法称为误差抵消调整法。这种装配方法在机床装配时应用广泛。例如,在机床主轴部件装配中,通过调整前后轴承的径向跳动方向来控制主轴的径向跳动;在滚齿机工作台分度蜗轮装配中,可以采用调整二者的偏心量和偏心方向,来提高其装配精度。

2. 固定调整装配法装配尺寸链的计算

计算固定调整法装配尺寸链时要解决三个问题:调整范围大小;需要几组调整环;每组调整环的尺寸大小。下面就通过一个实例来分析固定调整法装配尺寸链的计算过程。

【例 7-5】 图 7-25 所示为车床主轴大齿轮装配简图。要求隔套(尺寸 A_2)、齿轮(尺寸 A_3)、垫圈(尺寸 A_K)、弹性挡圈(尺寸 A_4)装在轴上之后,双联齿轮的轴向间隙为 $A_0=0.05\sim 0.2\text{mm}$,各组成环基本尺寸为 $A_1=115\text{mm}$, $A_2=8.5\text{mm}$, $A_3=95\text{mm}$, $A_4=2.5\text{mm}$ (标准件), $A_K=9\text{mm}$ 。试用固定调整装配法,确定各组成环的尺寸及调整环的分组数、尺寸系列。

解 (1) 建立装配尺寸链。如图 7-25 (a) 所示,其中封闭环 A_0 ,增环 A_1 ,减环 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_K 。

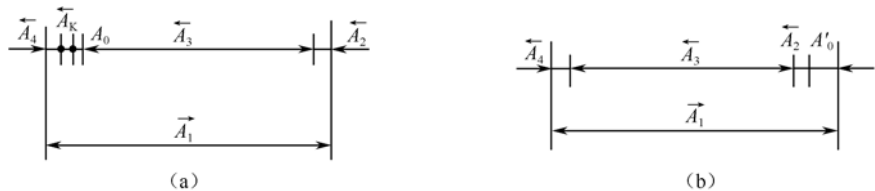


图 7-25 车床主轴箱大齿轮轴向装配简图及装配尺寸链图

- (2) 校验各组成环基本尺寸。 $A_0=A_1-A_2-A_3-A_4-A_K=0$ ，所以封闭环尺寸为 $A_0=0$ 。
- (3) 确定调整环。选择容易加工、测量和装卸方便的垫圈 (A_K) 为调整环。
- (4) 确定各组成环公差及偏差。按照经济加工精度或其他方法确定各组成环公差，并按“入体原则”进行标注。

$TA_1=0.15\text{mm}$, $TA_2=0.1\text{mm}$, $TA_3=0.1\text{mm}$, $TA_4=0.12\text{mm}$ (标准件), $TA_K=0.03\text{mm}$ (调整环取较小的公差, 避免影响调整能力)。并选 A_1 为协调环, 其余环按入体原则标注, 有: $A_2=8.5^{+0.10}_0\text{mm}$, $A_3=95^{+0.10}_0\text{mm}$, $A_4=2.5^{+0.12}_0\text{mm}$ (标准件), $A_K=9^{+0.03}_0\text{mm}$ 。

为保证 $A_{0\min}=0.05\text{mm}$, 由极值法解图 7-25 (a) 所示尺寸链得协调环尺寸 A_1 :

$$0.05=EI(A_1)-(0+0+0+0), EI(A_1)=0.05\text{mm}$$

则有:

$$A_1=115^{+0.20}_{+0.05}\text{mm}$$

- (5) 确定调整范围。调整范围即为空位尺寸 A'_0 , 如图 7-25 (b) 所示, 它是在未装入垫圈 A_K 前实测的间隙大小, 可由极值法解图 7-25 (b) 所示尺寸链, 得其变动范围为

$$A'_{0\max}=\sum_{z=1}^m A_{z\max}-\sum_{j=m+1}^{n-1} A_{j\min}=115+0.2-(8.5+95+2.5-0.1-0.1-0.12)=9.52\text{mm}$$

$$A'_{0\min}=\sum_{z=1}^m A_{z\min}-\sum_{j=m+1}^{n-1} A_{j\max}=115+0.05-8.5-95-2.5=9.05\text{mm}$$

即调整范围为 $A'_0=9.05\sim 9.52\text{mm}$, 调整范围公差为 $TA'_0=0.47\text{mm}$ 。

- (6) 确定调整能力 S 。每级调整环所能调整的空位尺寸的变动范围称为调整能力。

$$S=TA_0-TA_K=0.15-0.03=0.12\text{mm}$$

- (7) 确定分组数 N 。 $N=\text{调整范围公差}/\text{调整能力}=0.47/0.12=3.9\approx 4$ 。

- (8) 确定调整环尺寸系列。根据调整范围, 由分组尺寸间隔 S 可以从大到小分, 也可以从小到大分, 见表 7-4。

表 7-4 调整环尺寸系列

从小到大分时	从大到小时
$A_{k1}=A'_{0\min}-A_{0\min}=9.05-0.05=9$	$A_{k4}=A'_{0\max}-A_{0\max}=9.52-0.20=9.32$
$A_{k2}=A_{k1}+S=9+0.12=9.12$	$A_{k3}=A_{k4}-S=9.32-0.12=9.20$
$A_{k3}=A_{k2}+S=9.12+0.12=9.24$	$A_{k2}=A_{k3}-S=9.20-0.12=9.08$
$A_{k4}=A_{k3}+S=9.24+0.12=9.36$	$A_{k1}=A_{k2}-S=9.08-0.12=8.96$

调整环的尺寸分布及适用范围见表 7-5, 本表只列出从小到大分时情况, 读者可自行分析从大到小时的情况。

表 7-5 调整环尺寸分布及适用范围

组号	调整环尺寸（mm）	调整范围（mm）	调整后的实际间隙（mm）	制造数量
1	$9\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	9.06~9.17	0.05~0.20	少些
2	$9.12\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	9.17~9.29	0.05~0.20	多些
3	$9.24\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	9.29~9.41	0.05~0.20	多些
4	$9.36\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$	9.41~9.52	0.05~0.18	少些

7.4 装配工艺规程的制定

将装配工艺过程用文件的形式固定下来就是装配工艺规程。装配工艺规程是指导装配生产的主要技术文件，是制定装配生产计划、进行技术准备的主要依据，也是作为新建或改建机器制造厂装配车间的基本文件之一，制定装配工艺规程是生产技术准备工作的主要内容之一。

装配工艺规程对保证装配质量、提高装配生产效率、缩短装配周期、减轻装配工人的劳动强度、缩小装配占地面积、降低生产成本等都有重要的影响，这些都取决于装配工艺规程制订得合理与否，这也是制定装配工艺规程的目的。

7.4.1 准备原始资料

在制定装配工艺规程前，需要准备以下原始资料。

1. 产品的装配图及验收技术标准

产品的装配图应包括总装图和部件装配图，应能清楚地表示出：所有零件相互连接的结构视图和必要的剖视图；零件的编号；装配时应保证的尺寸；配合件的配合性质及精度；装配的技术要求；零件的明细表等。为了在装配时对某些零件进行补充机械加工和核算装配尺寸链，有时还需要某些零件图作为参考。产品装配图的审查内容如下：

- （1）审查图样的完整性、正确性，分析产品的结构工艺性，明确各零部件之间的装配关系。
- （2）审查产品装配的技术要求和检查验收方法，找出装配中的关键技术，并制订相应的技术措施，分析与计算产品装配尺寸链。

产品的验收技术条件、检验的内容和方法也是制订装配工艺规程的重要依据。

2. 产品的生产纲领

产品的生产纲领不同，生产类型也不同，从而致使装配的组织形式、工艺方法、工艺过程的划分及工艺装备、手工劳动所占的比例均有较大的不同。

3. 现有的生产条件

在制定装配工艺规程时，应了解现有的装配工艺设备、工人技术水平、装配车间面积等。在制定装配工艺规程时，应遵循以下基本原则：

- (1) 保证产品装配质量，并力求提高其质量，以延长产品的使用寿命。
- (2) 合理安排装配顺序和工序，尽量减少钳工装配的工作量，以减轻劳动强度、缩短装配周期、提高装配效率。
- (3) 尽可能减少装配的占地面积，有效提高车间的利用率。

7.4.2 确定装配方法与装配的组织形式

1. 装配生产类型及其特点

机器装配的生产类型，按装配产品的生产批量大小可分为单件小批生产、成批生产和大批大量生产三种类型。生产类型不同，装配工作的组织形式、装配方法、工艺装备等方面均有较大区别。各种生产类型的装配工作的特点见表 7-6。

表 7-6 各种生产类型装配工作的特点

生产类型		大批大量生产	成批生产	单件小批生产
基本特征		产品固定，生产活动长期重复，生产周期一般较短	产品在系列化范围内变动，分批交替投产或多品种同时投产。生产活动在一定时期内重复	产品经常变换，不定期重复生产，生产周期一般较长
装配工作特点	组织形式	多采用流水装配线：有连续移动、间隙移动及可变速节奏移动等方式，还可采用自动装配机或自动装配线	笨重、批量不大的产品多采用固定流水线装配，批量较大时采用流水装配，多品种平行投产时用多品种可变速节奏流水装配	多采用固定装配或固定式流水装配进行总装，同时对批量较大的部件也可采用流水装配
	装配工艺方法	按互换法装配，允许有少量简单的调整，精密配件成对供应或分组工艺装配，无任何修配工作	主要采用互换法，但灵活运用其他保证装配精度的装配工艺方法，如调整法、修配法及合并修配法，以节约加工费用	以修配法及调整法为主，互换件比例较少
	工艺过程	工艺过程划分很细，力求达到高度的均衡性	工艺过程的划分须适合于批量的大小，尽量使生产均衡	一般不制订详细工艺文件，工序可适当调动，工艺也可灵活掌握
	工艺装备	专业化程度高，宜采用专用高效工艺装备，易于实现机械化自动化	通用设备较多，但也采用一定数量的专用工、夹、量具，以保证装配质量和提高工效	一般为通用设备及通用工具、夹具、量具
	手工操作要求	手工操作比重小，熟练程度容易提高，便于培养新工人	手工操作比重较大，技术水平要求较高	手工操作比重大，要求工人有较高的技术水平和多方面的工艺知识
应用实例		汽车、拖拉机、内燃机滚动轴承、手表、缝纫机、电气开关	机床、机车车辆、中小型锅炉、矿山采掘机械	重型机床、重型机器、汽轮机、大型内燃机、大型锅炉

可以看出，对于不同的生产类型，其装配工作特点都有其内在的联系，而装配工艺方法也各有侧重。要提高单件小批生产的装配工作的效率，必须注意装配工作的各个特点，保留和发扬合理的部分，改进或废除不合理的做法，以大批大量生产类型所采用方法的装配实质，通过具体措施予以改进和提高。

2. 装配方法

装配方法随生产纲领和现有生产条件的不同而不同，要综合考虑加工和装配间的关系，使整个产品获得最佳技术经济效果。表 7-7 列举了各种装配方法的主要适用范围和部分典型应用举例。

表 7-7 各种装配方法的适用范围和应用举例

装 配 方 法	适 用 范 围	应 用 举 例
完全互换法	适用于零件数较少、批量很大、零件可用经济精度加工时	汽车、拖拉机、中小型柴油机、缝纫机及小型电机的部分部件
不完全互换法	适用于零件数稍多、批量大、零件加工精度需适当放宽时	机床、仪器仪表中某些部件
分组法	适用于成批或大量生产中，装配精度很高，零件数很少，又不便采用调整装置时	中小型柴油机的活塞与缸套、活塞与活塞销、滚动轴承的内外圈与滚子
修配法	适用于单件小批生产中，装配精度要求高且零件数较多的场合	车床尾座垫板、滚齿机分度蜗轮与工作台装配后精加工齿形、平面磨床砂轮（架）对工作台面自磨
调整法	除必须采用分组法选配的精密配件外，调整法可用于各种装配场合	机床导轨的楔形镶条、内燃机气门间隙的调整螺钉，滚动轴承调整间隙的间隔套、垫圈，锥齿轮调整间隙的垫片

究竟采取哪种装配方法来保证产品的装配精度要求，通常在设计阶段就应确定。因为只有当装配方法确定之后，才能通过尺寸链的计算，合理确定各个零部件在加工和装配中的技术要求。

3. 装配的组织形式

装配的组织形式主要取决于产品的结构特点（包括尺寸、质量和复杂程度等）、生产纲领和现有生产条件，可分为固定式和移动式两种。

固定式装配是指全部装配工作在同一固定的地点完成，其特点是装配周期长，装配面积利用率低，并且需要技术水平较高的操作工人，多用于单件小批生产或质量大、体积大的批量生产中。固定式装配也可组织工人专业分工，按装配顺序轮流到各产品点进行装配工作，这种形式称为固定流水装配，多用于成批生产中结构较复杂、工序数量较多的产品，如机床、汽轮机的装配。

移动式装配是将零、部件用输送带或输送小车，按装配顺序从一个装配地点有节奏地移动到下一装配地点，各装配地点分别完成其中的一部分装配工作，全部装配地点工作的总和就是产品的全部装配工作。这种装配组织形式常用于产品的大批量生产中，以组成流水作业线或自动作业线。根据零、部件移动的方式不同，移动式装配又分为连续移动、间歇移动和变节奏移动三种方式。

7.4.3 划分装配单元，确定装配顺序

1. 装配单元的划分

将产品划分为套件、组件和部件等装配单元是制订工艺规程中最重要的一个步骤，这对大批大量生产结构复杂的产品尤为重要。装配单元的划分就是从装配工艺角度出发，将产品分解

为可单独进行装配的装配单元。

2. 装配顺序的确定

划分装配单元后，可确定各装配单元的装配顺序。无论是哪一级装配单元，都要选定某些零件或比它低一级的装配单元作为装配基准件。

各级装配单元装配时，先要装配安排基准件进入装配。装配基准件通常应是产品的机体或主干零、部件，应具有较高的体积、质量和足够的支承面，以满足装入零、部件时的作业要求和稳定要求。然后再根据具体情况安排其他单元进入装配。例如车床装配时，床身是一个基准件先进入总装，其他的装配单元再依次进入装配。

装配顺序是由产品结构和组织形式决定的。一般装配顺序的安排是：预处理工序在前，先基准后其他，先重大后轻小，先下后上，先内后外，先难后易，先精密后一般。

此外，还应考虑以下情况：

- (1) 处于同一基准件方位的装配，应尽可能集中安排。
- (2) 使用相同设备及工艺装备或有共同特殊装配环境要求的装配，应集中安排。
- (3) 电线、油气管路的安装应与相应的工序同时进行。
- (4) 易燃、易爆、易碎或有毒物质的零部件安装，应尽可能安排在最后，以减少安全防护工作量，保证装配工作的顺利完成。

为了清楚表达装配顺序，对于结构比较简单、组成零部件较少的产品，需绘制产品装配系统图；对于结构复杂而组成的零部件多的产品，则还要绘制部件装配系统图等（见 7.1.2 节）。

如果装配过程中，需要进行一些必要的配作加工，如焊接、配刮、配钻、冷压、热压、攻螺纹和检验等，可在装配单元系统图中加以注明。此时装配系统图就成为装配工艺系统图，如图 7-26 所示为床身部件装配工艺系统图。

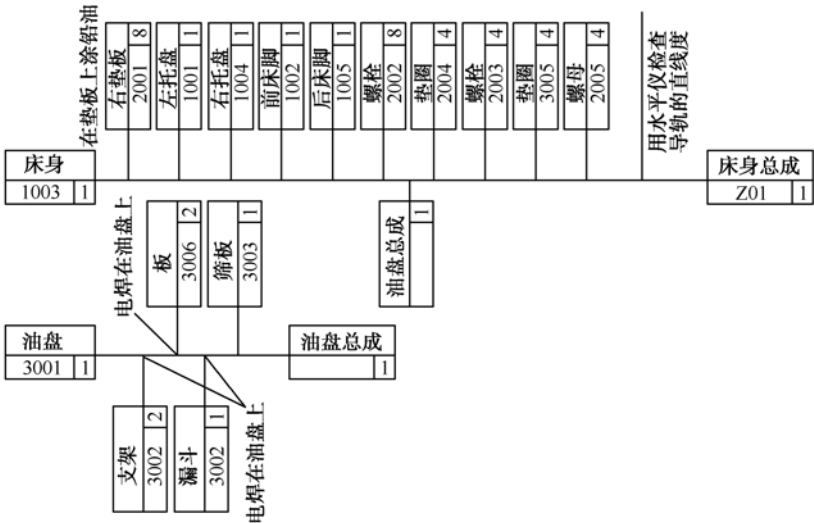


图 7-26 床身部件装配工艺系统图

装配工艺系统图是编制装配工艺规程的主要文件之一，也是划分装配工序的依据。

7.4.4 装配工序的划分与设计

装配顺序确定后,即可将装配工艺过程划分为若干工序,并确定各个工序的工作内容。

装配工艺过程是由站、工序、工步和操作组成的。

站是装配工艺过程的一部分,是指在一个装配地点,由一个或一组工人所完成的那部分装配工作。每一个站包括一个或数个工序。

工序是站的一部分,它包括在制品任何一部分上所完成组装的一切连续动作。

工步是工序的一部分,在每个工步中,所用的工具及组合件不变。但每个工步还可按技术条件分得更细,这主要取决于生产规模。

操作是指在工步进行过程中或工步的准备工作中的各个简单的动作。

在安排工序时,必须注意前一工序不得影响后一工序的进行;在完成某些重要工序或易出废品的工序后,均应安排检查工序;在流水式装配时,每一工序所需的时间应等于装配节拍或为其整数倍。

装配工序设计的内容包括:

- (1) 确定工序集中与分散的程度。
- (2) 确定工序数量、顺序和工作内容。
- (3) 确定各工序所需的设备及工具。如果需要专用夹具与设备,还必须提交设计任务书。
- (4) 制订各工序装配操作范围和操作规范,如过盈配合的压入方法、变温装配的温度值、紧固螺栓联结的预紧扭矩、配作要求等。
- (5) 制订各工序装配质量要求及检测方法、检测项目等。
- (6) 确定各工序的时间定额,平衡各工序的装配节拍。

7.4.5 填写装配工艺文件

在单件小批生产时,通常不编制装配工艺卡片,工人按照装配图和装配工艺系统图进行装配即可。

在成批生产时,应根据装配工艺系统图分别制订总装和部装的装配工艺过程卡片。

卡片的每一工序内容应简要地说明工序的工作内容、所需设备和工夹具的名称及编号、工人技术等级、时间定额等,具体见表 7-8。

大批大量生产时,还要为每一道工序制订装配工序卡片,详细说明该装配工序的工艺内容,以直接指导工人进行操作,具体见表 7-9。

此外,还应根据产品的装配要求,制订检验卡、试验卡等工艺文件。有些产品还要有测试报告、修正(校正)曲线等。

表 7-8 装配工艺过程卡片格式

[illegible]

7.4.6 制定产品检测与试验规范

产品装配完毕后,在出厂之前,要按图纸要求,制订检测与试验的规范,它包括下列内容:

- (1) 检测和试验的项目及检验质量指标;
- (2) 检测和试验的方法、条件与环境要求;
- (3) 检测和试验所需要的工装的选择与设计;
- (4) 检测和试验的程序和操作规程;
- (5) 质量问题的分析方法和处理措施。

7.5 机器结构的装配工艺性

同零件结构的机械加工工艺性一样,机器结构的装配工艺性对整个生产过程有较大的影响。机器结构的装配工艺性在一定程度上决定了装配过程周期的长短、耗费劳动量的大小、成本的高低以及机器使用质量的优劣等,因此应对机器结构的装配工艺性提出以下基本要求。

7.5.1 机器结构应能分成独立的装配单元

为了最大限度地缩短机器的装配周期,有必要把机器分成若干独立的装配单元,以便使许多装配工作同时平行进行,它是评定机器结构装配工艺的重要标志之一。

所谓独立的装配单元,就是要求机器结构能划分成独立的组件、部件等。首先按组件或部件分别进行装配,然后进行检验或试车,最后再进行总装配。例如,卧式车床是由主轴箱、进给箱、溜板箱、刀架、尾座和床身等部件组成的。这些独立的部件装配完之后,可以在专门的试验台上检验或试车,待合格后再送去总装,各装配单元之间的装配及连接通常是很简单、方便的装配过程。

把机器划分成独立装配单元,对装配过程有下述好处:

- (1) 可以组织平行的装配作业,各单元装配互不妨碍,缩短装配周期,或便于组织多厂协作生产。
- (2) 机器的有关部件可以预先进行调整和试车,各部件以较完善的状态进入总装,这样既可以保证总机的装配质量,又可以减少总装配的工作量。
- (3) 机器局部结构改进后,整个机器只是局部变动,使机器改装起来方便,有利于产品的改进和更新换代。
- (4) 有利于机器的维护检修,给重型机器的包装、运输带来很大方便。

另外,有些精密零、部件(如精密丝杠车床的丝杠等)不能在使用现场进行装配,而只能在特殊环境(如高度洁净、恒温等)中进行装配及调整,然后以部件的形式进入总装配。

图 7-27 (a) 所示的转塔车床,原先结构的装配工艺性较差,机床的快速行程轴的一端装在箱体 5 内,轴上装有一对圆锥滚子轴承和一个齿轮,轴的另一端装在拖板的操纵箱 1 内,这种结构装配起来很不方便。为此,将快速行程轴分拆成两个零件,如图 7-27 (b) 所示,一段为带螺纹的较长的光轴 2,另一段为较短的阶梯轴 4,两轴用联轴器 3 连接起来。这样,箱体、

操纵箱便成为两个独立的装配单元，分别平行装配。而且由于长轴被分拆为两段，其机械加工也比以前更容易了。

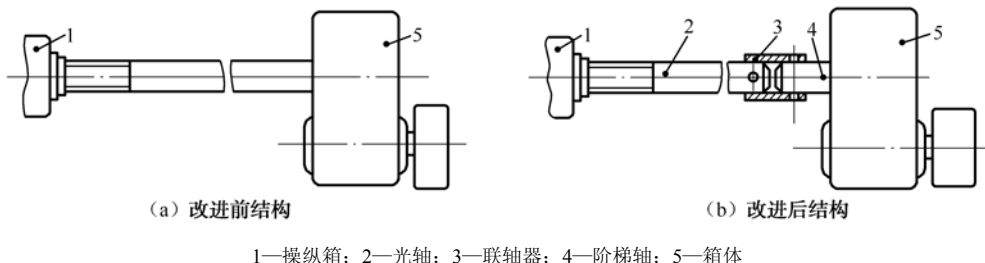


图 7-27 转塔车床的两种结构比较

图 7-28 所示为轴的装配，当轴上齿轮直径大于箱体轴承孔时（如图 7-28 (a) 所示），轴上零件需依次在箱内装配。当齿轮直径小于轴承孔时（如图 7-28 (b) 所示），轴上零件可在组装成组件后，一次装入箱体内，从而简化装配过程、缩短装配周期。

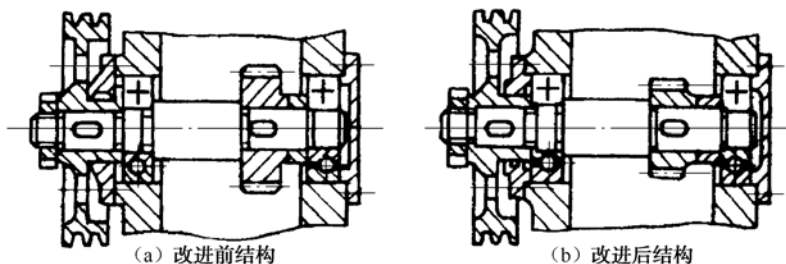


图 7-28 轴的两种结构比较

7.5.2 减少装配的修配和机械加工

多数机器在装配过程中，难免需要对某些零、部件进行修配，这不仅增加了难以事先确定的装配工作量，还要求工人具有较高的操作技艺。因此，装配过程中要尽量减少修配工作量。

首先，要尽量减少不必要的配合面。因为配合面过大、过多，零件机械加工就困难，装配时修刮量也必然增加。

其次，要尽量减少机械加工。装配过程中，机械加工工作越多，装配工作越不连续，装配周期越长；同时加工设备既占面积，又易引起装配工作混乱，其加工切屑还有可能造成机器不必要磨损，甚至产生严重事故而损坏整个机器。

图 7-29 所示为车床主轴箱与床身的装配结构，主轴箱如采用图 7-29 (a) 所示山形导轨定位，装配时，基准面修刮工作量很大。现采用图 7-29 (b) 所示平导轨定位，则装配工艺得到明显的改善。

在机器结构设计上，采用调整装配法代替修配法，可以从根本上减少修配工作量。图 7-30 所示为车床溜板和床身导轨后压板改进前后的结构。图 7-30 (b) 所示结构就是以调整法代替了修配法。来保证溜板压板与床身导轨间具有合理的间隙。

图 7-31 所示为两种不同的轴润滑结构。图 7-31 (a) 所示结构需要在轴套装配后，在箱体上配钻油孔，增加了装配的机械加工的工作量。图 7-31 (b) 所示结构改为在轴套上预先加工

好油孔，便可消除装配时的机械加工工作量。

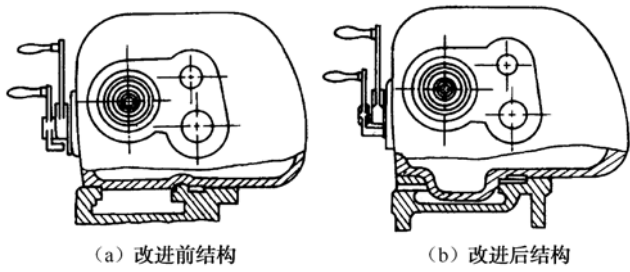


图 7-29 主轴箱与床身的不同装配结构形式

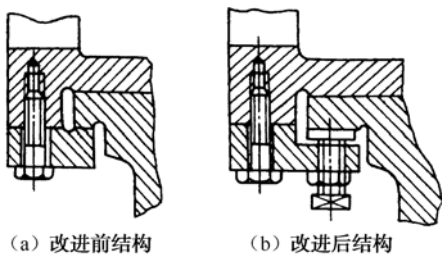


图 7-30 车床溜板后压板的两种结构

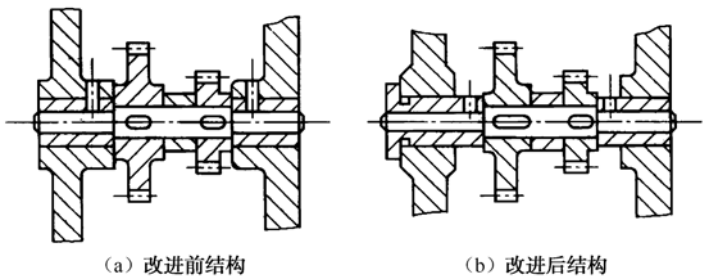


图 7-31 两种不同的轴上油孔结构

7.5.3 机器结构应便于装配和拆卸

机器的结构设计应使装配工作简单、方便。重要的一点是组件的几个表面不应该同时装入基准零件的配合孔中，而应该有先后次序进入装配。

如图 7-32 (a) 所示，轴上的两个轴承同时装入箱体零件的配合孔中，既不利于观察，导向性又差，给装配工作带来困难。若改为图 7-32 (b) 所示的结构形式，轴上的右轴承先行装入孔中 3~5mm 时，左轴承再开始装入，即可使装配工作简单方便。

此外，扳手工作空间过小、螺栓拧入深度不够等都会导致装配困难。

机器的结构设计应便于拆卸检修。由于磨损及其他原因，所有易损零件都要考虑拆卸方便问题。

如图 7-33 (a) 所示的轴承在更换时很难拆卸下来，改为图 7-33 (b) 结构就容易拆卸了。

在图 7-34 (a) 中，定位销孔为盲孔，取出定位销很困难，改为图 7-34 (b) 的通孔结构或图 7-34 (c) 的带有螺纹孔的定位销，就可以方便地取出定位销了。

装配工艺性问题看似简单,但对装配工作有重要影响,必须给予足够重视。

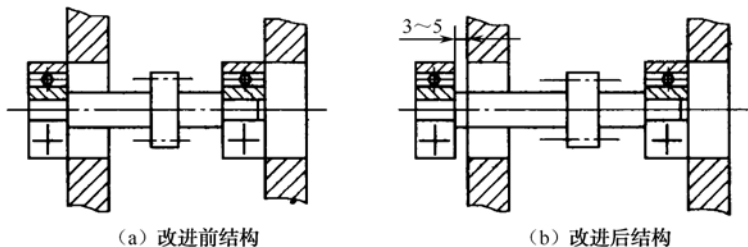


图 7-32 轴依次装配的结构

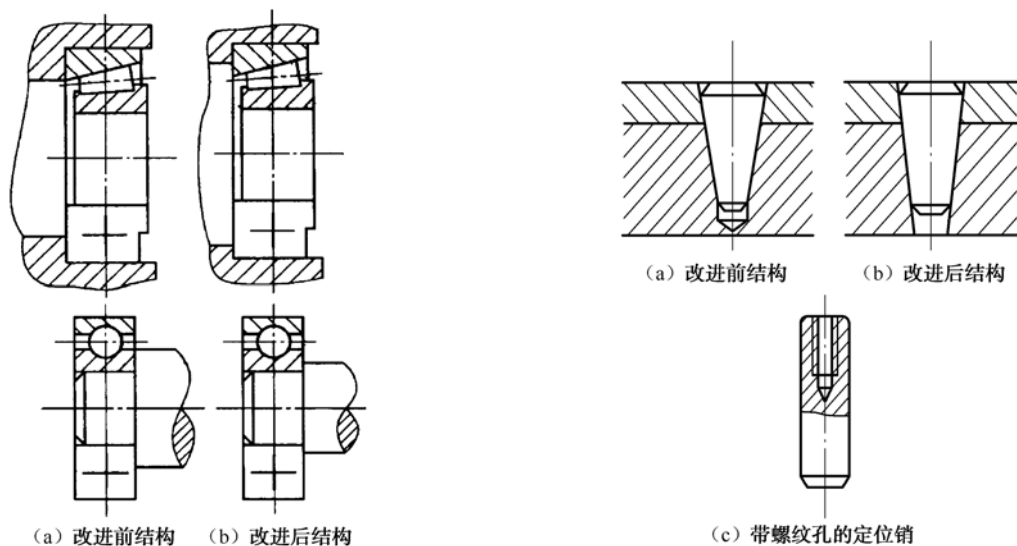


图 7-33 轴承结构应考虑拆卸问题

图 7-34 销孔的不同结构

7.6 机器装配自动化

在机械制造工业中,20%左右的工作量是装配,有些产品的装配工作量可达到70%左右。但装配又是在机械制造生产过程中采用手工劳动较多的工序。由于装配技术上的复杂性和多样性,所以装配过程不易实现自动化。近年来,在大批大量生产中,加工过程自动化获得了较快的发展,大量零件自动化高速生产出来后,如果仍采用手工装配,则劳动强度大、效率低、质量也不能保证,因此,迫切需要发展装配过程的自动化。

国外从20世纪50年代开始发展装配过程的自动化,60年代发展了数控装配机、自动装配线,70年代机器人已应用在装配过程中,近年来又研究应用了柔性装配系统(Flexible Assembling System, FAS)等。今后的趋势是把装配自动化作业与仓库自动化系统等连接起来,进一步提高机械制造的质量和劳动生产率。

装配过程自动化包括零件的供给、装配对象的运送、装配作业、装配质量检测等环节的自动化。最初从零部件的输送流水线开始,逐渐实现某些生产批量较大的产品,如电动机、变压

器、开关等的自动装配。现在，在汽车、武器、仪表等大型、精密产品中也已有应用。

7.6.1 自动化装配与装配机器人

自动装配机和装配机器人可用于各种形式的装配自动化；

- (1) 在机械加工中工艺成套件装配；
- (2) 被加工零件的组、部件装配；
- (3) 用于顺序焊接的零件的拼装；
- (4) 成套部件的设备的总装。

在装配过程中，自动装配机和装配机器人可完成以下形式的操作：零件传输、定位及其连接；用压装或由紧固螺钉、螺母使零件相互固定；装配尺寸控制，以及保证零件连接或固定的质量；输送组装完毕的部件或产品，并将其包装或堆垛在容器中等。

为完成装配工作，在自动装配机与装配机器人上必须装备相应的带工具和夹具的夹持装置，以保证所组装的零件相互位置的必要精度，实现单元组装和钳工操作的可能性，如装上一取下、拧出一拧入、压紧一松开、压入、铆接、磨光及其他必要的动作。

1. 自动装配机

产品的装配过程所包括的大量装配动作，人工操作时看似容易实现，但如用机械化、自动化代替手工操作，则对装配机要求具备高度准确和可靠的性能。因此，一般可从生产批量大、装配工艺过程简单、动作频繁或耗费体力大的零、部件装配开始，在经济上合理的情况下，逐渐实现机械化、半自动化和自动化装配。

首先发展的是各种自动装配机，它配合部分机械化的流水线和辅助设备实现了局部自动化装配和全自动化装配。自动装配机因工件输送方式不同可分为回转型和直进型两类，根据工序繁简不同，又可分为单工位、多工位结构。回转型装配机常用于装配零件数量少、外形尺寸小、装配节拍短或装配作业要求高的装配场合。至于基准零件尺寸较大、装配工位较多，尤其是装配过程中检测工序多或手工装配和自动装配混合操作的多工序装配，则以选择直进型装配机为宜。

2. 装配机器人

自动装配机配合部分手工操作和机械辅助设备，可以完成某些部件装配工作的要求。但是，在仪器仪表、汽车、手表、电动机、电子元件等生产批量大、要求装配相当精确的产品装配时，不仅要求装配机更加准确和精密，而且应具有视觉和某些触觉传感机构，反应更灵敏，对物体的位置和形状具有一定的识别能力。这些功能一般自动装配机很难具备，而 20 世纪 70 年发展起来的工业机器人则完全具备这些功能。

例如，在汽车总装配中，点焊和拧螺钉的工作量很大（一辆汽车有数百个甚至上千个焊点），又由于采用传送带流水作业，如果由人来进行这些装配作业，就会紧张到连喘气的时间都没有。而如果采用装配机器人，就可以轻松地完成这些装配任务。

又如，国外研制的精密装配机器人定位精度可高达 $0.02 \sim 0.05\text{mm}$ ，这是装配工人很难达到的。装配间隙为 $10\mu\text{m}$ 以下，深度达 30mm 的轴、孔配合，采用具有触觉反馈和柔性手腕的装配机器人，即使轴心位置有较大的偏离（可达 5mm ），也能自动补偿，准确装入零件，作业时间仅在 4s 以内。

7.6.2 装配自动线

相对机械加工过程自动化而言, 装配自动化在我国发展较晚, 20 世纪 50 年代末以来在轴承、电动机、仪器仪表、手表等工业中逐步开始采用半自动和自动装配生产线。例如, 球轴承自动装配生产线可实现零件的自动分选、自动供料、自动装配、自动包装、自动输送等环节。

现代装配自动化的发展, 使装配自动线与自动化立体仓库, 以及后一工序的检验、试验自动线连接起来, 用于同时改进产品质量和提高生产率。

为了适应产品批量和品种的变化, 国外研制了柔性装配系统 (FAS), 这种现代化的自动装配线, 采用各种具有视觉、触觉和决策功能的多关节装配机器人及自动化的传送系统。它不仅可以保证装配的质量和生产率, 也可以适应产品种类和数量的变化。

习题 7

7-1. 什么是零件、套件、组件和部件? 什么是机器的总装?

7-2. 装配工艺规程包括哪些主要内容? 经过哪些步骤制订的?

7-3. 装配精度一般包括哪些内容? 装配精度与零件的加工精度有什么区别? 它们之间又有什么关系? 试举例说明。

7-4. 装配尺寸链是如何构成的? 装配尺寸链封闭环是如何确定的? 它与工艺尺寸链的封闭环有什么区别?

7-5. 在查找装配尺寸链时应注意哪些原则?

7-6. 保证装配精度的方法有哪几种? 各适用于什么装配场合?

7-7. 说明装配尺寸链中的组成环、封闭环、协调环和补偿环的含义, 各有什么特点?

7-8. 机械结构的装配工艺性包括哪些主要内容? 试举例说明。

7-9. 什么是装配单元? 为什么要把机器划分成许多独立装配单元?

以下各计算题若无特殊说明, 各参与装配的零件加工尺寸均为正态分布, 且分布中心与公差带中心重合。

7-10. 现有一轴、孔配合, 配合间隙要求为 $0.04 \sim 0.26 \text{ mm}$, 已知轴的尺寸为 $\phi 50_{-0.10}^0 \text{ mm}$, 孔的尺寸为 $\phi 50_{+0.05}^{+0.20} \text{ mm}$ 。若用完全互换法进行装配, 能否保证装配精度要求? 用大数互换法装配能否保证装配精度要求?

7-11. 在 CA6140 车床尾座套筒装配图中, 各组成环零件的尺寸如图 7-35 所示, 若分别按完全互换法和大数互换法装配, 试分别计算装配后螺母在顶尖套筒内的端面圆跳动量。

7-12. 现有一活塞部件, 其各组成零件有关尺寸如图 7-36 所示, 试分别按极值公差公式和统计公差公式计算活塞行程的极限尺寸。

7-13. 减速机中某轴上零件的尺寸为 $A_1=40 \text{ mm}$, $A_2=36 \text{ mm}$, $A_3=4 \text{ mm}$, 要求装配后齿轮轴向间隙 $A_0 = 0_{+0.10}^{+0.25} \text{ mm}$, 结构如图 7-37 所示。试用极值法和统计法分别确定 A_1 、 A_2 、 A_3 的公差。

7-14. 如图 7-38 所示轴类部件, 为保证弹性挡圈顺利装入, 要求保持轴向间隙 $A_0 = 0_{+0.05}^{+0.41} \text{ mm}$ 。已知各组成环的基本尺寸 $A_1=32.5 \text{ mm}$, $A_2=35 \text{ mm}$, $A_3=2.5 \text{ mm}$ 。试用极值法和统计法分别确定各组成零件的上下偏差。

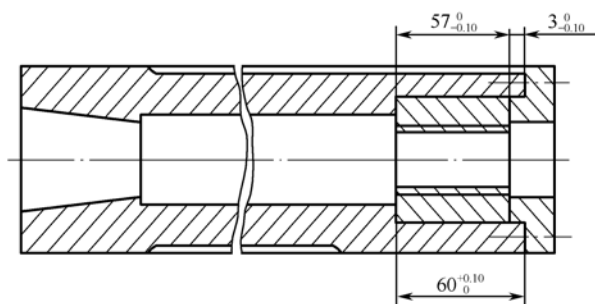


图 7-35 题 7-11 图

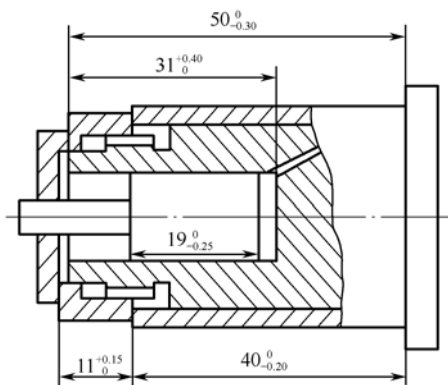


图 7-36 题 7-12 图

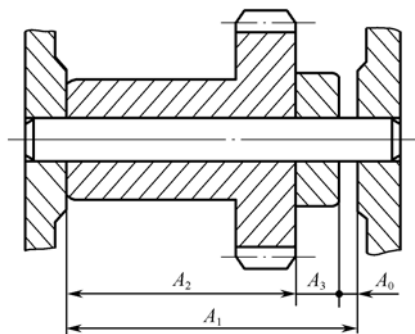


图 7-37 题 7-13 图

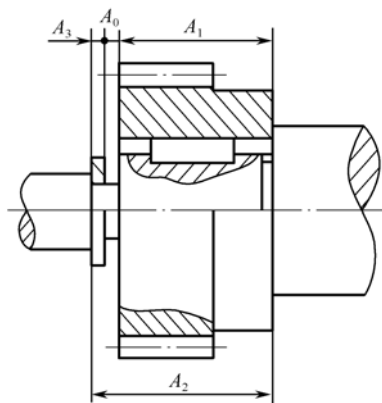


图 7-38 题 7-14 图

7-15. 图 7-39 所示为车床床鞍与床身导轨装配图, 为保证床鞍在床身导轨上准确移动, 装配技术要求规定: 其配合间隙为 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ 。试用修配法确定各零件有关尺寸及其公差。

7-16. 图 7-40 所示为传动轴装配图。现采用调整法装配, 以右端垫圈为调整环 A_K , 装配精度要求 $A_0 = 0.05 \sim 0.20 \text{ mm}$ (双联齿轮的端面圆跳动量)。试采用固定调整法确定各组成零件的尺寸及公差, 并计算加入调整垫片的组数及各组垫片的尺寸及公差。

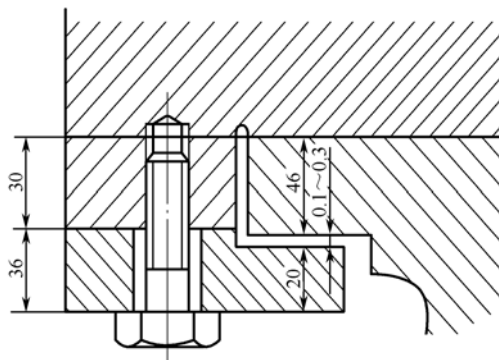


图 7-39 题 7-15 图

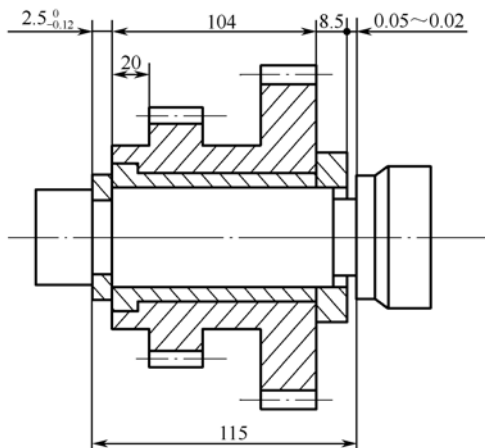


图 7-40 题 7-16 图

第 8 章

现代制造技术的发展与前沿

8.1 概述

8.1.1 现代制造技术的发展过程

20 世纪 60 年代，随着市场竞争的日益加剧，大规模生产方式面临着新的挑战。产品制造企业的生产方式开始向多品种、中小批量生产方式转变。同时，微电子技术以及计算机技术迅速发展，并积极应用于实际生产，极大地促进了制造业的工艺装备技术的进步，为制造企业实现多品种、中小批量的生产方式创造了有力的条件。这个时期诞生的制造技术与制造装备主要有计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺设计（CAPP）、计算机辅助工程（CAE）、计算机辅助制造（CAM）、现代数控机床、柔性制造系统（FMS）、即时生产（JIT）等。

进入 20 世纪 80 年代后，一方面市场环境发生了新的变化，消费者需求日趋个性化和多样化，市场竞争日益激烈；另一方面，科技发展也进入了一个新的时代，电子信息技术和自动化技术迅猛发展。制造的理念、技术和装备也进入了新的发展时期，出现了制造资源规划（MRP II）、企业资源规划（ERP）、计算机集成制造系统（CIMS）、并行工程（CE）、精益生产（LP）等。

20 世纪 90 年代以来,以互联网为代表的信息技术革命给世界带来了巨大的变化,经济全球化进程也打破了传统的地域经济发展模式,市场变得更为广阔。在这样的背景下,提高制造企业的快速响应能力以适应瞬息万变的市场需求,成为制造企业应得市场竞争的关键。围绕着一个目标,出现了许多的先进制造系统模式,如敏捷制造、虚拟制造、智能制造及绿色制造等。

8.1.2 现代制造技术的产生及特点

1. 现代制造技术的产生

19 世纪末,自然科学和工业技术进入了鼎盛发展时期,出现了许多划时代的科学发展和新技术发明,并相应建立了新的自然科学理论和新的学科体系,为能量驱动型的传统制造向信息驱动型的现代制造发展奠定了理论基础,创造了技术条件,这些科学和技术进展可归纳如下。

(1) 19 世纪末自然科学的全面发展。19 世纪末,自然科学领域进入了一个全面发展的时期,不断产生新的重大发现和创立新的科学理论体系。例如,1895 年 W.C.伦琴发现 X 射线;1896 年 H.贝克勒发现放射性;1897 年 J.J.汤姆逊发现电子;1898 年居里夫人发现镭;20 世纪初量子论、相对论和量子力学的建立,人们对原子结构的认识,核裂变的发现,固体电子理论建立,高温和低温物理研究,超导发现等。在此基础上,粒子物理学、现在宇宙学、量子化学、分子生物学、环境科学与脑科学等新科学和现代数学也得到发展(数理逻辑和集合论、非标准分析、突变论、模糊数学等),并且贝塔朗菲于 1934 年提出系统论,1948 年香农创造并在 70 年代后全面发展了信息论,1984 年维纳创造控制论。

(2) 新技术的产生。自然科学的全面进步,促进了新技术的发明和创造,产生了新兴材料技术(新冶炼技术、新合金材料、高分子材料、无机非金属材料、复合材料等)、新切削加工技术(数控机床、新刀具、超高速和精密加工)、大型发电和传输技术、核能技术、微电子技术(集成电路、计算机、电视、广播和雷达)、自动化技术、激光技术、生物技术和系统工程技术。

(3) 社会发展对制造技术提出了需求。人类社会跨入 20 世纪后,物质需求不断提高,在科学和技术进步的同时,受到地球有限资源和环境条件约束,随着全球市场的逐渐形成,世界范围的竞争日益加剧,日益提高的生活质量要求与世界能源的减少和人口增长的矛盾更加突出。因此,社会发展对经济支撑行业——制造业及其技术体系提出了更高的需求,要求制造业具有更加快速和灵活的市场响应、更高的产品质量、更低的成本和能源消耗,以及良好的环保特性。这一需求促使传统制造在 20 世纪开始了又一次新的革命性的变化和进步,传统制造开始向现代制造发展。

2. 现代制造技术的特点

现代制造技术的最大特点是计算机技术、信息技术、管理等科学与制造科学的交叉融合。与传统制造技术相比,现代制造技术具有以下特点:

(1) 现代制造技术的覆盖范围更加广泛。传统制造技术一般是指加工制造过程的工艺方法,而现代制造技术则覆盖了从产品设计、加工制造到产品销售、使用、维修和回收的整个生命周期。

(2) 现代制造过程呈多学科、多技术交叉及系统优化集成的发展态势。传统制造技术的学科单一、界限分明,而现代制造技术的学科交叉、技术融合,形成了集成化的新技术。

(3) 现代制造技术的基础是优质、高效、低耗、无污染或少污染的加工工艺,在此基础上形成了新的先进加工工艺与技术。

(4) 现代制造技术从单一目标向多元目标转变,强调优化制造系统的产品上市时间、质量、成本、服务、环保等要素,以满足日益激烈的市场竞争的要求。

(5) 现代制造技术正在从以物质流和能源流为要素的传统制造观向着信息流、物质流及能量流为要素的现代制造观转变,信息流在制造系统中的地位已经超越了物质流和能量流。

(6) 现代制造技术特别强调以人为本,强调组织、技术与管理的集成,制造技术与生产管理相互融合、相互促进,制造技术的改进带动了管理模式的提高,而先进的管理模式又推动了制造技术的应用。

8.1.3 现代制造技术的内容

现代制造技术是一个涉及范围非常广泛、技术领域非常繁多的复杂系统。为便于学生学习与掌握制造技术的基本体系和主要内容,本书从制造技术的功能性角度,将现代制造技术简明地分为五大类型,并以此基本顺序,对现代制造技术的主要内容分别进行介绍。

1. 现代设计技术

现代设计技术是现代制造技术的基础。随着以微电子技术、信息技术、材料科学、系统科学、设计与制造科学、优化理论、人机工程等为代表的新一代科学技术的迅猛发展,现代设计技术的发展可谓日新月异,新的设计理念不断涌现,新的设计方法不断诞生,现代设计技术的深度和广度得到了空前的拓展。先后出现了优化设计、计算机辅助装配工艺设计、计算机辅助夹具设计、反求工程、面向产品全生命周期的设计、基于网络技术的异地设计、智能设计、虚拟设计、绿色设计等。

2. 现代加工技术

现代制造技术的发展包含了机械制造工艺的变革与发展,因为制造工艺与加工方法是制造技术的核心和基础。现代加工技术主要涉及先进切削加工技术、成型加工技术、变形加工技术、表面工程技术以及特种加工技术等。随着机械制造工艺技术水平的提高,加工制造精度在不断提高,目前工业发达国家在加工精度方面已达到纳米级;由于超高速切削、超高速磨削技术的实际应用,以及车、铣、镗、钻、磨等不同工序和粗精加工的不同工序的集成,极大地提高了机械加工的效率;制造材料如超硬材料、超塑材料、高分子材料、复合材料、工程陶瓷、非晶微晶合金、功能材料等不断推陈出新,扩展了加工对象,同时促进了崭新加工技术的出现;新的制造工艺理念的突破,也诞生了快速原型等新型加工模式。

3. 自动化技术

制造自动化可以说是现代制造技术最显著的特征。制造自动化技术经历了一个长期的发展过程,从早期的刚性自动化、数控加工等阶段,发展到柔性制造、计算机集成制造等阶段。其中最为重要的内容,包括数控加工技术、工业机器人技术、柔性制造技术和计算机集成制造技

术等。数控技术是自动化技术的基础及关键单元技术,又是精密、高效、高可靠性加工技术的支撑;机器人是一种高柔性化的自动化设备,未来的典型制造工厂将是计算机网络控制的包含机器人加工单元的分布式自主制造系统;柔性制造适用于多品种、中小批量的生产,主要涉及柔性制造单元、柔性制造系统、柔性加工线、制造过程监控技术等;计算机集成制造的特征是强调制造全过程的系统性和集成型,它涉及的学科技术非常广泛,包括现代制造技术、管理技术、计算机技术、信息技术、自动化技术和系统工程技术等。

4. 制造管理技术

广义地讲,制造系统是由加工对象、制造装备以及人员组织等构成的一个有机整体。其中,企业的战略决策、组织构架、人力资源、信息流、物流等的管理与控制,也是非常重要的方面。纵观制造技术的发展历程可以发现,在制造技术不断发展的同时,也伴随着制造管理技术的同步发展。20 世纪初期出现了大批量生产方式以及“流水生产线”管理技术;20 世纪 50 年代以后,在制造领域先后出现了成组技术、全面质量管理,物流需求规划、即时生产、精益生产、企业资源规划等科学的管理思想和管理方法;近十年来,在并行工程、敏捷制造、虚拟制造、绿色制造等先进制造技术中,更是蕴藏了丰富的管理科学理念和新型管理模式。

5. 先进制造技术

为了迎接知识经济时代的到来以及经济全球化的挑战,以信息技术为代表的高新技术被广泛应用于制造业,美国、日本及欧洲国家对先进制造技术进行了大量研究,提出许多制造技术新概念、新思想和新模式,先后诞生了计算机集成制造系统、并行工程、精益生产、敏捷制造、虚拟制造、绿色制造等先进制造技术。通常将这些制造技术和制造模式称为先进制造技术(AMT)。AMT 是制造技术、计算机技术、通信技术、自动化技术以及管理科学等多学科技术综合运用于制造工程而形成的一个学科体系。进入 21 世纪后,AMT 正在向着柔性化、集成化、网络化、虚拟化、清洁化等方向发展。

8.2 难加工材料的特种加工

8.2.1 基本概念

随着科学技术、工业生产的发展及各种新兴产业的涌现,工业产品内涵和外延都在扩大,正向着高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化、环保(绿色)化及人本化方向发展。制造技术本身也应适应这些新的要求而发展,传统机械制造技术和工艺方法面临着更多、更新、更难的问题,体现在如下几方面:

(1) 新型材料及传统的难加工材料,如碳纤维增强复合材料、工业陶瓷、硬质合金、钛合金、耐热钢、镍合金、钨钼合金、不锈钢、金刚石、宝石、石英以及锆、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性、耐高温的金属或非金属材料的加工。

(2) 各种特殊复杂表面,如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、发动机机匣和锻压模的立体成型表面,各种冲模冷拔模上特殊断面的异型孔,炮管内膛线,喷油嘴、棚网、喷丝头上的小孔、

窄缝、特殊用途的弯孔等的加工。

(3) 各种超精、光整或具有特殊要求的零件，如对表面质量和精度要求很高的航天、航空陀螺仪，伺服阀，以及细长轴、薄壁零件等低刚度零件的加工。

上述工艺问题仅仅依靠传统的切削加工方法很难、甚至根本无法解决。特种加工就是在这种前提条件下产生和发展起来的。特种加工是指直接利用电能、光能、声能、化学能及电化学能去除材料的加工方法。其共同的特点是：加工时工具与工件不直接接触，没有显著的机械力，工具的硬度可以比工件低，因此可以加工用传统机械加工方法难以加工或无法加工的高硬度、高强度、高脆性材料或具有细微小孔、深孔、窄缝、型腔以及低刚度、薄壁等零件。

特种加工的方法较多，它们的基本原理、适用范围见表 8-1。

表 8-1 常见特种加工方法

特种加工方法	加工所用能量	可加工材料	主要适用范围
电火花加工	电热能	任何导电的金属材，如硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢等	各种冲、压、锻模及三维成型曲面的加工
电火花线切割	电热能		各种冲模及二维曲面的成型截割
电化学加工	电、化学能		锻模及各种二维、三维成型表面加工
电化学机械复合加工	电、化、机械能		硬质合金等难加工材料的磨削
超声加工	声、机械能	任何脆硬的金属及非金属材料	石英、玻璃、锗、硅、硬质合金等脆硬材料的加工、研磨
快速成型	光、热、化学	树脂、塑料、陶瓷、金属、纸张、ABS	制造各种模型
激光加工	光、热能	任何材料	加工精密小孔、小缝及薄板材成型切割、刻蚀
电子束加工	电、热能		
离子束加工	电、热能		表面超精、超微量加工、抛光、刻蚀、材料改性、镀膜

8.2.2 电火花加工

电火花加工又称放电加工、电蚀加工（Electro-Discharge Machining，EDM），是利用工具电极和工件电极间瞬时火花放电所产生的高温来熔蚀工件的表面材料，达到加工目的的一种加工方法。

1. 电火花加工的原理

如图 8-1 所示，进行电火花加工时，工具和工件都浸在具有一定绝缘度的液体介质（常用煤油或矿物油）中，脉冲电源的一极接工具电极，另一极接工件电极。自动调节进给装置使工具与工件之间保持一定的放电间隙（0.01～0.20mm）。当脉冲电压升高时，使两极间产生火花放电，放

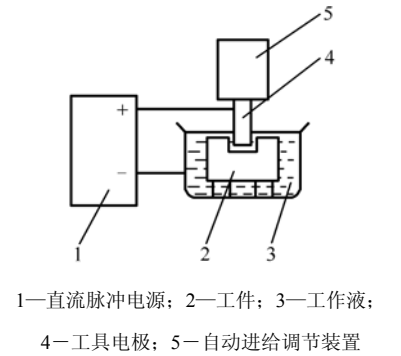


图 8-1 电火花加工装置及原理示意图

电通道的电流密度为 $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ ，放电区的瞬时高温达 10000°C 以上，使工具和工件表面都蚀除微量的材料。当电压下降时，工作液恢复绝缘。这种放电循环每秒钟数千到数万次，使工件表面形成许多非常小的凹坑，称为电蚀现象。如此高频率的循环，加上工具电极不断地向工件进给，它的形状最终就复制在工件上，形成所需要的加工表面。

2. 电火花加工设备

电火花加工设备由四个基本部分组成。

(1) 脉冲电源：用它来产生间隙间的脉冲电压，使介质不断被周期性地、重复地破坏，由脉冲放电来蚀除金属。

(2) 间隙自动调节器：其任务是维持一定的放电间隙，保证电火花加工稳定、正常地进行，以获得较好的加工效果。

(3) 液体介质循环系统：其作用是及时排除间隙中的电蚀产物。一般是采用强迫循环，液体介质需经过滤，以防止因介质中电蚀产物过多而引起短路或电弧。

(4) 机床本体：用它来固定工件或工具，实现工具与工件之间精确的相对运动。

3. 电火花加工的特点

1) 电火花加工的优点

(1) 适用于难切削材料的加工。可以突破传统切削加工对刀具的限制，实现用软的工具加工硬韧的工件，甚至可以加工像聚晶金刚石、立方氮化硼一类超硬材料。目前电极材料多采用紫铜或石墨，因此工具电极较容易加工。

(2) 可以加工特殊及复杂形状的零件。由于加工中工具电极和工件不直接接触，没有机械加工的切削力，所以适合加工低刚度工件及进行微细加工。由于可以简单地将工具电极的形状复制到工件上，所以特别适用于复杂表面形状工件的加工，如复杂型腔模具加工等。数控电火花加工可以用简单形状的电极加工复杂形状零件。

(3) 主要用于加工金属等导电材料，在一定条件下也可以加工半导体和非导体材料。

(4) 加工表面微观形貌圆滑，工件的棱边、尖角处无毛刺、塌边。

(5) 工艺灵活性大，本身有“正极性加工”（工件接电源正极）和“负极性加工”（工件接电源负极）加工之分；还可与其他工艺结合，形成复合加工，如与电解加工复合。

2) 电火花加工的局限性

(1) 一般加工速度较慢。安排工艺时可采用机械加工去除大部分余量，然后再进行电火花加工以求提高生产率。最新研究表明，采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工，其生产率甚至高于切削加工。

(2) 存在电极损耗和二次放电。电极损耗多集中在尖角或底面，最近的机床产品已能将电极相对损耗比降至 0.1% ，甚至更小；电蚀产物在排除过程中与工具电极距离太小时会引起二次放电，形成加工斜度，影响成型精度。二次放电甚至会使得加工无法继续。

(3) 最小角部半径有限制。一般电火花加工能得到的最小角部半径等于加工间隙（通常为 $0.02 \sim 0.3 \text{ mm}$ ），若电极有损耗或采用平动、摇动加工则角部半径还要增大。

4. 电火花加工的类型

按工具电极和工件相对运动的方式和用途的不同，电火花加工大致可分为电火花成型加工、

电火花线切割、电火花回转加工、电火花表面强化与电火花刻字等。

(1) 电火花成型加工：主要指穿孔加工、型腔加工等。穿孔加工主要是加工冲模、型孔和小孔（一般为 $\phi 0.05 \sim 2\text{mm}$ ），冲模是指凹模。型腔加工主要是加工型腔模和型腔零件，相当于加工形成盲孔。

(2) 电火花线切割加工：电火花线切割加工的基本原理如图 8-2 所示。被切割的工件作为工件电极，电极丝作为工具电极。电极丝接脉冲电源的负极，工件接脉冲电源的正极。当来一个电脉冲时，在电极丝和工件之间可能产生一次火花放电，在放电路道的中心温度瞬时可高达 5000°C 以上，高温使工件局部金属熔化，甚至有少量气化，高温也使电极丝和工件之间的工作液部分产生气化，这些气化后的工作液和金属蒸气瞬间迅速热膨胀，并具有爆炸的特性。靠这种热膨胀和局部微爆炸，抛出熔化和气化了了的金属材料而实现对工件材料进行电蚀切割加工。根据电极丝的运行速度，电火花线切割机床可分为高速往复走丝线切割（或称快走丝线切割）机床和低速单向走丝线切割（或称慢走丝线切割）机床两大类。

高速往复走丝线切割电极丝多用钼丝，走丝速度一般为 $2.5 \sim 10\text{m/s}$ 。电极丝使用一段时间后要更换新丝，以免因损耗断丝而影响工作。

低速单向走丝电火花切割电极丝多用铜丝，为一次性使用，走丝速度一般低于 0.2m/s 。由于电极丝走丝平稳无振动，损耗小，所以加工精度高，表面粗糙度小，同时断丝可以自动停机报警，并有气动自动穿丝装置，使用方便。

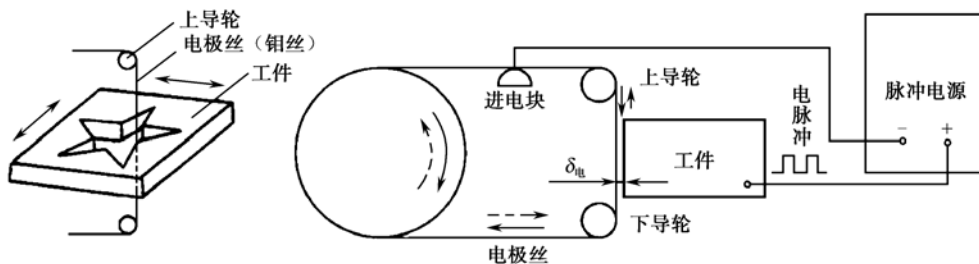


图 8-2 电火花线切割加工基本原理

5. 电火花加工的应用范围

电火花加工的应用范围十分广泛，是特种加工中应用最为广泛的方法。

- (1) 穿孔加工：可以加工型孔、曲线孔（弯孔、螺旋孔）、小孔等。
- (2) 型腔加工：可以加工锻模、压铸模、叶片、整体叶轮等零件。
- (3) 线电极切割：可以完成切断、开槽、窄缝、型孔、冲模等加工。
- (4) 回转共轭加工：将工具电极做成齿轮和螺纹状，利用回转共轭原理，可以分别加工模数相同、齿数不同的内外齿轮和螺距、牙型一致的内外螺纹。
- (5) 电火花回转加工：加工时工具电极回转，类似钻削、铣削和磨削，可以提高加工精度。此时，工具电极可以分别做成圆柱状和圆盘状，称为电火花钻削、铣削和磨削。
- (6) 金属表面强化。
- (7) 打印标记、仿形刻字等。

8.2.3 电解加工

1. 电解加工的原理

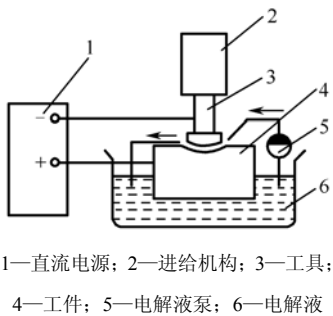


图 8-3 电解加工原理示意图

电解加工是利用金属在电解液中产生阳极溶解的化学原理来加工工件的，其原理如图 8-3 所示。工件接直流电源的正极，工具接负极，两极间保持一定间隙（ $0.1\sim0.8\text{mm}$ ）。电解液以一定的压力（ $0.5\sim2\text{MPa}$ ）和速度（ $5\sim50\text{m/s}$ ）从间隙间流过。当接通直流电源时（电压为 $5\sim20\text{V}$ ，电流密度为 $10\sim100\text{A/cm}^2$ ），工件与阴极接近的表面金属开始电解。工具以一定的速度（ $0.5\sim3\text{mm/min}$ ）向工件进给，逐渐使工具的形状复印到工件上，得到所需要的加工形状。

2. 电解加工的特点及应用

- （1）多次重复加工中工件尺寸精度达 0.1mm ，表面粗糙度值为 $Ra=0.8\sim0.2\mu\text{m}$ 。
- （2）电解加工过程中不存在切削力，所以不会产生残余应力及变形，没有冷作硬化、烧伤退火层。
- （3）电解加工的生产率比电火花加工的高 $5\sim10$ 倍以上。
- （4）加工范围极广，可加工硬质合金、不锈钢、淬火钢、耐热合金等难加工的材料，并可加工叶片、锻模等复杂型面。
- （5）对大面积能同时进行加工，阴极工具没有损耗，可长期使用。
- （6）电解加工的附属设备多，造价高，占地面积大，加工稳定性不够高。同时，电解液易腐蚀机床和污染环境，必须引起重视。

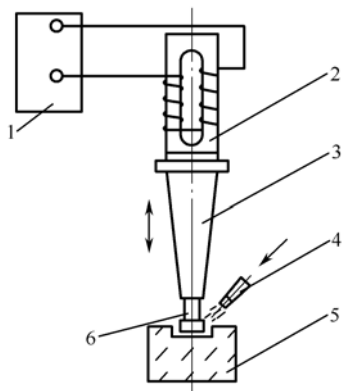
3. 电解加工方法及其应用

除了上述基本方法之外，还有混气电解加工、振动进给脉冲电流电解加工及电解磨削等复合加工方式。

8.2.4 超声加工

1. 超声加工的原理

超声加工是利用超声频振动（ 16kHz 以上）的工具冲击磨料，使工作液中的悬浮磨粒对工件撞击、抛磨来实现加工的一种方法。其加工原理如图 8-4 所示。超声发生器将工频交流电能转变为有一定功率输出的超声频电振荡，通过换能器将超声频电振荡转变为超声机械振动，其振幅一般只有 $5\sim10\mu\text{m}$ ，再通过一个上粗下细的振幅扩大棒，使振幅扩大到 $10\sim100\mu\text{m}$ ，固定在振幅扩大棒端头的工具即产生超声振动。



1—超声发生器；2—换能器；3—振幅扩大棒；4—工作液；5—工件；6—工具

图 8-4 超声加工原理示意图

2. 超声加工的特点

(1) 超声加工适合加工各种硬脆材料，尤其是利用电火花和电解难以加工的不导电材料和半导体材料，如玻璃、陶瓷、玛瑙、宝石、金刚石及锗和硅等。

(2) 工件只受磨料瞬时局部撞击压力，不存在横向摩擦力，所以受力很小。

(3) 除去加工材料是靠微小的磨料作用，故加工精度高。尺寸精度达 0.02mm ，粗糙度为 $Ra=0.4\sim 0.1\mu\text{m}$ ，表面无残余应力，无金相组织变化及烧伤破坏层。

(4) 被加工的工件形状与工具的形状一致，只要工具做成一定的形状和尺寸，工件就可以加工出来。如果加工六角形、方形等非圆形，还可以进行成型加工、雕刻花纹及图案等。

(5) 机床简单，操作维修方便。

3. 超声加工的应用

超声加工应用范围十分广泛。除了一般加工以外，还可以进行超声旋转加工，这时用烧结金刚石材料制成的工具绕其本身轴线做高速旋转，因此除了超声撞击作用以外，还有工具回转的切削作用，生产率高。此外，还有超声波机械复合加工、超声波焊接和涂敷、超声清洗等。

8.2.5 激光加工

1. 激光加工的原理

激光是一种经受激辐射产生的加强光。光的强度高，方向性、相干性和单色性好。通过光学系统可将激光束聚焦成直径为几十微米到几微米的极小光斑，从而获得极高的能量密度 ($10^8\sim 10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$)。当激光照射到工件表面，光能被工件吸收并迅速转化为热能，光斑区域的温度可达 1 万度以上，使材料熔化甚至气化，达到加工的目的。

2. 激光加工的特点及应用

(1) 激光聚焦后的焦点直径理论上可小至 0.001mm 以下，实用上可实现 0.01mm 左右的小

孔加工和窄缝切割,所以可以用它来进行微细加工。

(2) 激光几乎可以加工任何金属与非金属材料,如高熔点材料、耐热合金及陶瓷、宝石、金刚石等硬脆材料。

(3) 激光加工是非接触加工,加工中热变形、热影响区都很小,适用于微细加工。

(4) 通用性强。同一台激光加工装置可做多种加工用,同时可控性好,易于实现自动化。

3. 激光加工应用

激光加工已用于激光打孔、激光切割、激光焊接、激光热处理等,是一种极有前途的精密加工方法。

(1) 激光打孔。利用激光几乎可在任何材料上打微型小孔,目前已应用于火箭发动机和柴油机的燃料喷嘴加工、化学纤维喷丝板打孔、钟表及仪表中的宝石轴承打孔、金刚石拉丝模加工等方面。

激光打孔适合于自动化打孔,如钟表行业红宝石轴承上 $\phi 0.12 \sim 0.18\text{mm}$ 、深 $0.6 \sim 1.2\text{mm}$ 的小孔采用自动传送每分钟可以加工几十个;又如生产化学纤维用的喷丝板,在直径为 $\phi 100\text{mm}$ 的不锈钢喷丝板上打一万多个直径为 0.06mm 的小孔,采用数控激光加工,不到半天即可完成。激光打孔的直径可以小到 0.01mm 以下,深径比可达 $60:1$ 。

(2) 激光切割。工件与激光束相对移动,可切割各种二维形状工件,由于激光器相对娇贵,在生产实践中,一般都是移动二维数控工作台。如果是直线切割,还可借助柱面透镜将激光束聚焦成面束,以提高切割速度。激光可用于切割各种各样的材料,还能切割无法进行机械接触的工件(如从电子管外部切断或焊接内部的灯丝)。由于激光对被切割材料几乎不产生机械冲击和压力,故适用于切割玻璃、陶瓷和半导体等既硬又脆的材料。再加上激光光斑小、切缝窄,便于自动控制,所以更适用于对细小部件做各种精密切割。切割金属材料时采用同轴吹氧工艺可以大大提高切割速度,而且粗糙度也明显减小。切割布匹、纸张、木材等易燃材料时,采用同轴吹保护气体(二氧化碳、氮气等),能防止烧焦和缩小切缝。英国生产的二氧化碳激光切割机附有氧气喷枪,切割 6mm 厚的铁板速度达 3m/min 以上。美国已用激光代替等离子体切割,速度可提高 25% ,费用降低 75% 。

(3) 激光焊接。焊接时不需要切割、打孔那么高的能量密度,只要将工件的加工区“烧熔”使其黏合在一起。因此,激光焊接所需要的能量密度较低,通常可用减小激光输出功率来实现。也可通过调节焦点位置来减小工件被加工点的能量密度。

激光焊接有如下优点:

① 激光照射时间短,焊接过程极为迅速,它不仅有利于提高生产率、而且被焊材料不易氧化,热影响区极小,适用于对热敏感很强的晶体管组件焊接。

② 激光焊接没有焊渣,无须去除工件的氧化膜,甚至可以透过玻璃进行焊接,适用于微型精密仪表中的焊接。

③ 激光不仅能焊接同种材料,而且还可以焊接不同的材料,甚至还可以焊接金属与非金属材料,如用陶瓷作为基体的集成电路。

(4) 激光热处理。激光热处理的过程是将激光束扫射零件表面,光能量被零件表面吸收零件表面迅速升温,产生相变甚至熔融;激光束离开零件表面,零件表面的热量马上向内部传递以极高的速度冷却。与火焰淬火、感应淬火等成熟工艺相比,其优缺点如下:

① 加热快。 0.5s 内就可以将工件表面加热到临界点以上,热影响区小,工件变形小,处

理后不需要修磨或只需要精磨。

② 光束传递方便，便于控制，可以对形状复杂的零件或局部处进行处理，如盲孔底、深孔内壁、小槽等。

③ 加热点小，散热快形成自淬火，不需要冷却介质，不仅节省能源，并且工作环境清洁。

④ 激光热处理的弱点是硬化层较浅，一般小于 1mm；另外设备投资和维护费用较高。

激光热处理已经成功应用于发动机凸轮轴、曲轴和纺织锭尖等部位的热处理，提高耐磨性。

8.2.6 电子束加工

1. 电子束加工原理

如图 8-5 所示，在真空条件下，利用电流加热阴极发射电子束，经控制栅极初步聚焦后，由加速阳极加速，并通过电磁透镜聚焦装置进一步聚焦，使能量集中到直径 $\phi 5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的斑点内。高速而能量密集的电子束冲击到工件上，使被冲击部分的材料温度在几分之一微秒内升高到几千摄氏度以上，这时热量还来不及向周围扩散就可以把局部区域的材料瞬时熔化、气化甚至蒸发而去除。

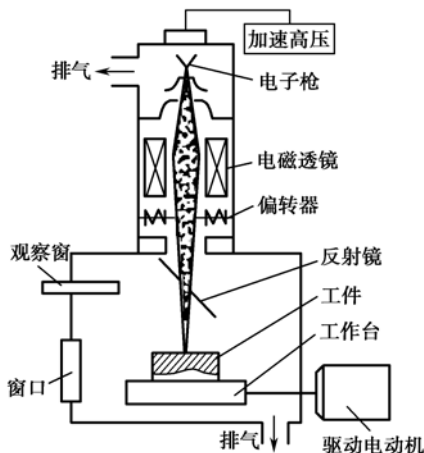


图 8-5 电子束加工原理

2. 电子束加工装置

电子束加工装置主要由电子枪、真空系统、控制系统和电源系统等组成。电子枪由电子发射阴极、控制栅极和加速阳极组成，用于发射高速电子流、进行初步聚焦，并使得电子加速。真空系统的作用是造成真空工作环境，因为在真空中电子才能高速运动，发射阴极不会在高温下氧化，同时也防止被加工表面和金属蒸气氧化。控制系统由聚焦装置、偏转装置和工作台位移装置等组成，控制电子束的束径大小和方向，按照加工要求控制工作台在水平面的两坐标位移。电源系统提供稳压电源、各种控制电压和加速电压。

3. 电子束加工的特点

(1) 细微聚焦：最细聚焦直径达到 $0.1 \mu\text{m}$ ，是一种精细工艺。

(2) 能量密度高: 蒸发去除材料, 非接触加工无机械力; 适合各种材料——脆性、韧性、导体、非导体加工。

(3) 生产率高: 如对于 2.5mm 厚度的钢板加工直径 0.4mm 的孔, 可达每秒 50 个。

(4) 控制容易: 磁场/电场控制可对聚焦、强度、位置等实现自动化控制。

(5) 真空中加工使得工件和环境无污染, 适用于纯度要求高的半导体加工。

(6) 真空系统及本体系统设备比较复杂, 设备成本高。

4. 电子束加工的应用范围

电子束可用来在不锈钢、耐热钢、合金钢、陶瓷、玻璃和宝石等材料上打圆孔、异形孔和槽, 最小孔径或缝宽可达 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ 。电子束还可用来焊接难熔金属、化学性能活泼的金属, 以及碳钢、不锈钢、铝合金、钛合金等。另外, 电子束还可用于微细加工的光刻中。

(1) 高速打孔: 目前最小孔直径可达 0.003mm , 速度达每秒 $3000\sim 50000$ 个孔, 对人造革、塑料等打细孔后可增加透气性。

(2) 型面和特殊面: 在打小孔、锥孔、斜孔等方面, 电子束加工已代替电火花加工; 控制磁场强度和电子速度后, 可以加工曲面、曲槽、弯孔等。

(3) 蚀刻: 加工半导体微电子器件, 制造多层固体组件, 刻细槽。

(4) 焊接: 精加工后精密焊, 焊接强度高于本体, 缝深而窄; 可对难熔金属、异种金属焊接。

(5) 热处理: 电子束热处理电热转换率可高达 90%, 比激光热处理的 (7%~10%) 高得多; 熔化后置入新合金可对零件改性。

(6) 光刻: 即电子束曝光, 对电致抗蚀剂的高分子材料, 由入射电子与高分子碰撞, 切断分子链或重新聚合而引起分子量变化, 图形分辨率高达 $0.25\mu\text{m}$, 而可见光曝光 $>1\mu\text{m}$; 还可实现电子束缩放曝光, 用于大规模集成电路上数十万个元件的集成。

电子束加工时, 高能量的电子会渗入表层达几微米甚至几十微米, 并以热的形式传输到相当大的区域, 因此它作为超精密加工方法时要注意其热影响, 但作为特种加工方法是有效的。

8.2.7 离子束加工

1. 离子束加工原理

离子束加工的加工原理与电子束加工原理基本类似, 也是在真空条件下, 将离子源产生的离子束经过加速、聚焦后投射到工件表面的加工部位以实现加工的。所不同的是离子带正电荷, 其质量比电子大数千倍甚至数万倍, 故在电场中加速较慢, 但一旦加至较高速度, 就比电子束具有更大的撞击动能。

离子束加工的物理基础是离子束射到材料表面时所发生的撞击效应、溅射效应和注入效应。

2. 离子束加工装置

离子束加工装置由离子源系统、真空系统、控制系统和电源组成。可见, 离子束加工装置与电子束加工装置基本类似, 主要的不同部分就是离子源系统。离子源又称离子枪, 其工作原

理是将气态原子注入离子室,经高频放电、电弧放电、等离子体放电或电子轰击等方法被电离成等离子体,并在电场作用下使离子从离子源出口孔引出而成为离子束。

3. 离子束加工的分类

按加工目的和所利用的物理效应不同,离子束加工分为如下几种。

(1) 离子刻蚀:离子以一定角度轰击工件,表面原子逐个剥离,实质上是一种原子尺度的切削加工,称为离子铣削,即纳米加工。

(2) 离子溅射沉积:离子以一定角度轰击靶材,靶材原子逐个剥离后,沉积在工件上,使工件镀上一层靶材薄膜,实质上是一种镀膜工艺。

(3) 离子镀:离子分两路以不同角度同时轰击靶材和工件,目的在于增强靶材镀膜与工件基材的结合力;又被称为离子溅射辅助沉积。

(4) 离子注入:离子以较大的能量垂直轰击工件,使离子直接进入工件,成为工件体内材料的一部分,达到材料改性的目的。

4. 离子束加工的特点

(1) 高精度:逐层去除原子,控制离子密度和能量加工可达纳米级,镀膜可达亚微米,离子注入的深度、浓度可以精确控制。离子束加工是目前特种加工中最精密、最微细的加工,是纳米加工工艺的基础。

(2) 高纯度、无污染:适用于易氧化材料和高纯度半导体加工。

(3) 宏观压力小:无应力、热变形,适用于低刚度工件。

(4) 设备费用、成本高,加工效率低。

5. 离子束加工的应用范围

离子束加工被认为是最有前途的超精密加工和微细加工方法,其应用范围很广,可根据加工要求选择离子束直径和功率密度。例如,进行去除加工时,离子束直径较小而功率密度较大;进行注入加工时,离子束直径较大而功率密度较小。

离子束去除加工可用于非球面透镜的成型、金刚石刀具和压头的刃磨、集成电路芯片图形的曝光和刻蚀。离子束镀膜加工是一种干式镀,比蒸镀有更高的附着力,效率也高。离子束注入加工可用于半导体材料掺杂、高速钢或硬质合金刀具材料切削刃表面改性等。

8.3 超精密加工技术

8.3.1 概述

精密及超精密加工对尖端技术的发展起着十分重要的作用。当今各主要工业化国家都投入了巨大的人力物力来发展精密及超精密加工技术,它已经成为现代制造技术的重要发展方向之一。

精密加工和超精密加工代表了加工精度发展的不同阶段,从一般加工发展到精密加工,再到超精密加工。由于生产技术的不断发展,划分的界限将随着发展进程而逐渐向前推移,因此

划分是相对的,很难用数值来表示。现在,精密加工是指加工精度为 $1\sim 0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度小于 $Ra=0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 的加工技术;超精密加工是指加工精度高于 $0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度小于 $Ra=0.025\mu\text{m}$ 的加工技术。当前,超精密加工的水平已达到了纳米级,形成了纳米技术,而且正在向更高水平和更大广度发展。

精密加工和超精密加工是由日本提出的。在欧洲和美国,通常将精密加工技术和超精密加工技术统称为精密工程。

8.3.2 精密和超精密加工方法

根据加工方法的机理和特点,精密加工和超精密加工方法可分为刀具切削加工、磨料加工、特种加工和复合加工等。

由于精密加工和超精密加工方法很多,现择其主要的几种方法进行论述。

1. 金刚石刀具超精密切削

1) 金刚石刀具超精密切削机理

金刚石刀具超精密切削是极薄切削,其背吃刀量可能小于晶粒的大小,切削就在晶粒内进行。这时,切削力一定要超过晶粒内部非常大的原子、分子结合力,刀刃上所承受的切应力就急速增加并变得非常大。例如在切削低碳钢时,其应力值将接近该材料的抗剪强度。因此刀刃将会受到很大的应力,同时产生很大的热量,刀刃切削处的温度将极高,要求刀具材料应有很高的高温强度和高温硬度。并且由于金刚石材料本身质地细密,经过精密研磨,切削刃钝圆半径可达 $0.02\sim 0.005\mu\text{m}$,而且切削刃的几何形状可以加工得很好,表面粗糙度可以很小,因此能够进行 $Ra=0.05\sim 0.008\mu\text{m}$ 的镜面切削,达到比较理想的效果。

通常,精密切削和超精密切削都是在低速、低压、低温下进行,这样切削力很小,切削温度很低,工件被加工表面塑性变形小,加工精度高,表面粗糙度值小,尺寸稳定性好。金刚石刀具超精密切削是在高速、小背吃刀量、小进给量下进行的,是在高应力、高温下切削,由于切削极薄、切速高,不会波及工件内层,所以塑性变形小,同样可以获得高精度、低表面粗糙度值的加工表面。

目前,金刚石刀具主要用来切削铜、铝及其合金。当切削钢铁等含碳金属材料时,由于会产生亲和作用,产生碳化磨损(扩散磨损),不仅刀具易于磨损,而且影响加工质量,切削效果不理想。

2) 影响金刚石刀具超精密切削的因素

金刚石刀具超精密车削过程中,对精度和表面粗糙度影响最大的是主轴回转精度,因此主轴采用液体静压轴承或空气静压轴承,以取其流体薄膜均匀的优点,其回转精度高于 $0.05\mu\text{m}$ 。振动对表面粗糙度极其有害,工件与刀具切削刃之间不允许振动,因此工艺系统应有较大的刚度,同时电动机和外界的振源应严格隔离。热变形对形状误差影响很大,特别是主轴热变形影响更大,因此应设置冷却系统来控制机床及其切削区域的温度,并应在恒温室中工作。机床工作台和床身导轨的几何精度、位置精度和进给传动系统的结构尺寸误差和形状误差有加大影响,应有较高的系统刚度。工件材料的种类、化学成分、性质、质量对加工质量有直接影响。金刚石刀具的材质、几何形状、刃磨质量和安装调整对加工质量有直接影响。对于数控超精密加工机床,除一般精度外,还有随动精度,它包括速度误差(跟随误差)、加速度误差(动态

误差)和位置误差(反向间隙、死区、失动),这些误差会影响尺寸精度和形状精度。

总结起来,影响金刚石刀具超精密切削的因素有以下几点:

(1) 金刚石刀具材料的材质、几何角度设计、晶面选择、刃磨质量及其对刀。

(2) 金刚石刀具超精密切削机床的精密、刚度、稳定性、抗振性和数控功能。机床关键部件是主轴系统、导轨及进给驱动装置,机床上都设有性能良好的温控系统,机床结构上已广泛采用花岗石材料。

(3) 被加工材料的均匀性和微观缺陷。

(4) 工件的定位和夹紧。

(5) 工作环境。应有恒温、恒湿、净化和抗振条件,才能保证加工质量。

金刚石刀具超精密切削铜、铝及其合金等软金属是当前最有成效的精密和超精密加工方法,钢铁等材料的金刚石刀具超精密切削正在研究之中。

2. 精密磨削

精密磨削是指加工精度为 $1\sim 0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度达到 $Ra=0.2\sim 0.025\mu\text{m}$ 的磨削方法,它又称为小粗糙度磨削。

1) 精密磨削机理

精密磨削主要是靠砂轮的精密修整,使磨粒具有微刃性和等高性,磨削后,加工表面留下大量极细微的磨削痕迹,残留高度极小,加上无火花磨削阶段的作用,获得高精度和小表面粗糙度的加工表面。

精密磨削的机理归纳为:①微刃的微切削用,磨粒的微刃性和等高性;②微刃的等高切削作用;③微刃的滑挤、摩擦、抛光作用。

2) 精密磨削砂轮及其修整

精密磨削时砂粒上大量的等高微刃是金刚石修整工具以极低而均匀的进给($10\sim 15\text{mm/min}$)精细修整而得到的,砂轮修整是精密磨削的关键之一。精密磨削砂轮选择的原则应是易产生和保持微刃。砂轮的粒度可选择粗粒度和细粒度两种,粗粒度砂轮经过精密修整,微刃切削作用是主要的;细粒度砂轮经过精密修整,半钝态微刃在适当压力下与工件表面的摩擦抛光作用比较显著,其加工表面粗糙度值较粗粒度砂轮所加工的要小。

精密磨削砂轮修整方法有单粒金刚石修整、金刚石粉末烧结型修整器修整和金刚石超声波修整。一般修整时,修整器应安装在低于砂轮中心 $0.5\sim 1.5\text{mm}$ 处,尾部向上倾斜 $10^\circ\sim 15^\circ$,使金刚石受力小,使用寿命长。砂轮修整的规范为:修整器进给速度 $10\sim 15\text{mm/min}$,修整深度 $2.5\mu\text{m}/\text{单行程}$,修整 $2\sim 3$ 次单行程,光修(无修整深度) 1 次单行程。

3) 精密磨床结构

磨床应有高几何精度,如主轴回转精度、导轨直线度,以保证工件几何形状精度要求;应有高精度的横向进给机构,以保证工件的尺寸精度,以及砂轮修整时的修整深度;还应有低速稳定性好的工作台纵向移动机构,不能产生爬行、振动,以保证砂轮的修整质量和加工质量。由于砂轮修整时的纵向进给速度很低,其低速稳定性对砂轮修整的微刃性和等高性非常重要,是一定要保证的。

影响精密磨削质量的因素很多,除上述分析的砂轮选择及其修整、磨床精密及其结构外,还有磨削工艺参数选择、工作环境等诸多因素的影响。

3. 超硬磨料砂轮精密和超精密磨削

超硬磨料砂轮目前主要指金刚石砂轮和立方氮化硼(CBN)砂轮,主要用来加工难加工材料,如各种高硬度、高脆性材料,其中有硬质合金、陶瓷、玻璃、半导体材料及石材等。这些材料的加工一般要求较高,故多属于精密和超精密加工范畴。

1) 超硬磨料砂轮磨削特点

超硬磨料砂轮磨削的共同特点是:

(1) 可用来加工各种高硬度、高脆性金属和非金属难加工材料。对于钢铁等材料适合用立方氮化硼砂轮磨削。

(2) 磨削能力强,耐磨性好,使用寿命长,易于控制加工尺寸及实现加工自动化。

(3) 磨削力小,磨削温度低,加工表面质量好。

(4) 磨削效率高。

(5) 加工综合成本低。

现在,金刚石砂轮、立方氮化硼砂轮已广泛用于精密加工,近年来发展起来的金刚石微粉砂轮超精密磨削已日趋成熟,将在生产中推广应用。金刚石砂轮精密和超精密磨削已成为陶瓷、玻璃、半导体、石材等高硬度脆材料的主要加工手段。

2) 超硬磨料砂轮修整

超硬磨料砂轮磨削时,也有砂轮选择、机床结构、磨削工艺、砂轮修整和平衡、磨削液等问题,其中砂轮修整问题比较突出,故做一简要陈述。

分析砂轮的修整过程,可以将它分为整形和修锐两个阶段。整形是使砂轮达到一定几何形状的要求(砂轮出厂时,其几何形状不够精确,砂轮安装在机床主轴上时也会有偏差);修锐是去除磨粒间的结合剂,使磨粒突出结合剂一定高度(一般是磨粒尺寸的 $1/3$ 左右),形成足够的切削刃和容屑空间。普通砂轮的修整是整形和修锐两步进行。整形要求几何形状和高效率,修锐要求磨削性能。修整机理是除去金刚石颗粒间的结合剂,使金刚石颗粒露出来,而不是把金刚石颗粒修锐出切削刃。

超硬磨料砂轮的修整方法很多,视不同的结合剂材料而定。目前,有以下几种方法。

(1) 车削法:用单点、聚晶金刚石笔修整,修整精度较好、效率较高,但砂轮切削能力低。

(2) 磨削法:用碳化硅砂轮修整,修整质量和效率较好,但碳化硅砂轮磨损很快,是目前最广泛采用的方法。

(3) 电加工法:有电解修锐法、电火花修正法等,只适用于金属(或导电)材料结合剂砂轮,修整效果较好。电解修锐法的效果比较突出,已广泛地应用于金刚石微粉砂轮的超精密加工中,并易于实现在线修锐。

4. 精密和超精密砂带磨削

砂带磨削是一种高效磨削方法,能得到高的加工精度和表面质量,具有广阔的应用前景,可补充或部分代替砂轮磨削。

1) 砂带磨削方式

砂带磨削方式可分为闭式和开式两大类。

(1) 闭式砂带磨削:采用无接头或有接头的环形砂带,通过张紧轮紧,由电动机通过接触轮带动砂带高速回转,砂带线速度为 30m/s ,工件回转或者移动(加工平面),砂带头架做纵向

和横向进给,从而对工件进行磨削。砂带磨钝后,换上一条新砂带即可。这种方式效率高,但噪声大,易发热,可用于粗加工和精加工。

(2) 开式砂带磨削:采用成卷砂带,由电动机经减速机构通过卷带带动砂带做缓慢的移动,砂带绕过接触轮外圆以一定的工作压力与工件被加工表面接触,工件回转或移动(加工平面),砂带头架或工作台做纵向和横向进给,从而对工件进行磨削。由于砂带在磨削过程中的连续缓慢移动,切削区域不断出现新砂粒,但砂粒不断退出,因而磨削工作状态稳定,磨削质量和效果好,多用于精密和超精密磨削中,但效率不如闭式砂带磨削高。

砂带振动磨削是通过接触轮带动砂带做沿接触轮轴向振动,可减小表面粗糙度值和提高效率。砂带磨削按砂带与工件接触形式来分,可分为接触轮式、支撑板(版)式、自由浮动接触式和自由接触式等。按照加工表面类型来分,可分为外圆、内圆、平面、成型表面等磨削方式。

2) 砂带磨削特点及其应用范围

砂带磨削的特点可归纳为以下几点:

(1) 砂带本身有弹性,接触轮外圆有橡胶或塑料等弹性层,因此砂带与工件是柔性接触,磨粒载荷小而均匀,具有抛光作用,同时又具有减振作用,故称为“弹性”磨削。

(2) 用静电植砂法制作砂带,磨粒有方向性,同时磨粒的切削刃间隔长,摩擦生热少,散热时间长,切削不易堵塞,力、热作用小,有较好的切削性,有效地减少了工件变形和表面烧伤,故又有“冷态”磨削之称。

(3) 强力砂带磨削的效率可与铣削、砂轮磨削媲美。砂带无须修整,磨削比(切除工件质量与磨料磨损质量之比)较高,因此又有“高效”磨削之称。

(4) 砂带制作比砂轮制作简单,无烧结、修整工艺问题,易于批量生产,价格便宜,使用方便,是一种“廉价”磨削。

(5) 可生产各种类型的砂带磨床,用于加工外圆、内圆、平面和成型表面。砂带磨削头架可作为部件安装在车床、立式车床等各类机床上进行磨削加工。它可加工各种金属和非金属材料,有很强的适应性,是一种“适应”磨削,

砂带磨削的关键部位是磨削头架,磨削头架的关键零件是接触轮(板)。

5. 精密研磨抛光方法

近年来,在磨削和抛光方法上出现了许多方法,如油石研磨、磁性研磨、电解研磨、化学机械抛光、机械化学抛光、软质磨粒抛光(弹性发射加工)、浮动抛光、液中研抛、喷射加工、砂带研抛、超精研抛等。现仅以磁性研磨和软质磨粒抛光为例进行阐述。

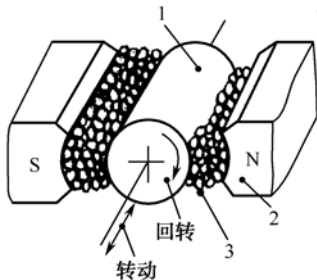
1) 磁性研磨

工件放在两磁极之间,工件和极间放入含铁的刚玉等磁性磨料,在直流磁场的作用下,磁性磨料沿磁力线方向整齐排列,如同刷子一般对被加工表面施加压力,并保持加工间隙。研磨压力的大小随磁场中磁通密度及磁性磨料填充量的增大而增大,因此可以调节。研磨时,工件一面旋转,一面沿轴线方向振动,使磁性磨料与被加工表面之间产生相对运动。这种方法可研磨轴类零件内外圆表面,也可以用来去毛刺。它对钛合金的研磨效果较好,如图8-6所示。

2) 软质磨粒抛光

软质磨粒抛光的特点是可以较软的磨粒,甚至比工件材料还要软的磨粒(如 SiO_2 、 ZrO_2 等)来抛光。同时工件与抛光器不接触,它不产生机械损伤,大大减少一般抛光中所产生的微裂纹、磨粒嵌入、洼坑、麻点、附着物、污染等缺陷,能获得极好的表面质量。

典型的软质磨粒机械抛光是弹性发射加工，它是一种无接触的抛光方法，是利用水流加速微小磨粒，使磨粒与工件被加工表面产生很大的相对运动，并以很大的动能撞击工件表面的原子晶格，使表层不平处的原子晶格受到很大的剪切力，致使这些原子被移去。图 8-7 所示是其原理图，抛光液的入射角（与水平面的夹角）要尽量小，以增加剪切力，抛光器为聚氨酯球，抛光时抛光器与工件不接触。



1—工件；2—磁极；3—磁性磨料

图 8-6 磁性研磨原理

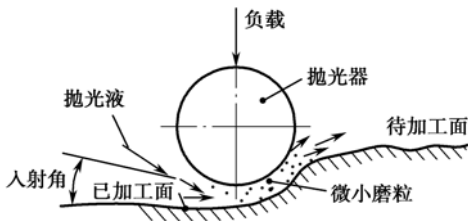


图 8-7 弹性发射加工原理

8.3.3 微细加工技术

1. 微细加工的概念及其特点

微细加工技术是指制造微小尺寸零件的生产加工技术。从广义的角度来说，微细加工包含了各种传统精密加工方法（如切削加工、磨料加工等）及特种加工（如外延生产、光刻加工、电铸、激光束加工、离子束加工等），它属于精密加工和超精密加工范畴。从狭义的角度来说，微细加工主要指半导体集成电路制造技术，因为微细加工技术的出现和发展与大规模集成电路有密切关系，其主要技术有外延生长、氧化、光刻、选择扩展和真空镀膜等。

微小尺寸加工和一般尺寸加工是不同的，主要表现在精度的表示方法上，一般尺寸加工时，精度是用加工误差与加工尺寸的比值来表示的。在现行的公差标准中，公差单位是计算标准公差的基本单位，它是基本尺寸的函数。基本尺寸越大，公差单位也越大，因此属于同一公差等级的公差，公差单位数相同，但对于不同的基本尺寸，其公差数值就不同。在微细加工时，由于加工尺寸很小，精度用尺寸的绝对值来表示，即用去除的一块材料的大小来表示，从而引入加工单位尺寸（简称加工单位）的概念，加工单位就是去除的一块材料的大小。

微细加工的特点与精密加工类似，可参考精密加工和超精密加工部分的论述。

目前，通过各种微细加工方法，在集成电路基片上制造出的各种各样的微型机械，发展十分迅速。

2. 微细加工方法

微细加工方法和精密加工方法一样，也可以分为切削加工、磨料加工、特种加工、复合加工，大多数方法是共同的。由于微细加工与集成电路关系密切，故采用分离（去除）加工、结合变形加工，这样从机理来分类较好。

微细加工技术的各种加工方法可用树状结构表示，如图 8-8 所示。目前微细加工正向着高

深宽比三维工艺方向发展。

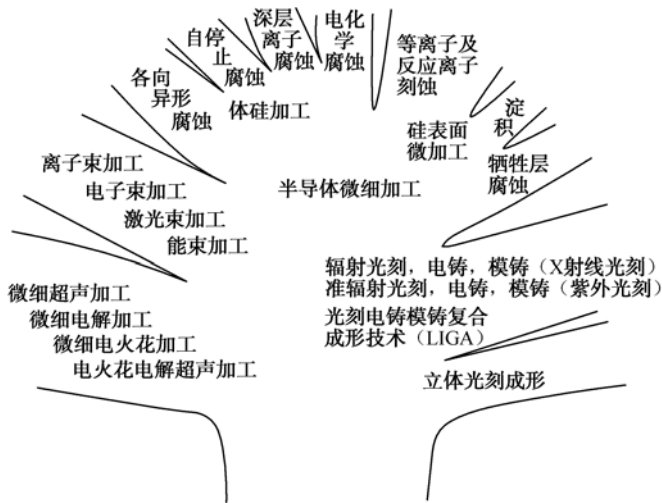


图 8-8 微细加工方法树状图

在微细加工中，光刻加工是其主要加工方法之一，它又称光刻蚀或刻蚀加工，简称刻蚀，主要是制作由高精度微细线条所构成的高密度微细复杂图形。

光刻加工可分为两个阶段：第一阶段为原版制作，生成工作原版或工作掩膜，即光刻时的模板；第二阶段为光刻。

光刻过程如图 8-9 所示，分为涂胶、曝光、显影与烘干、刻蚀、剥膜与检查等工作。

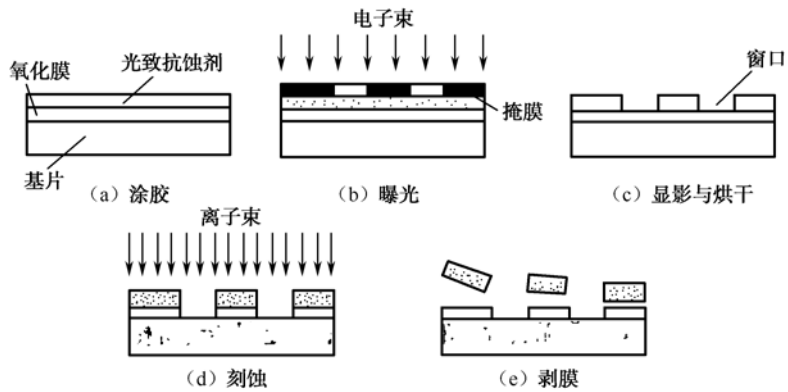


图 8-9 光刻过程

- (1) 涂胶：把光致抗蚀剂涂覆在已镀有氧化膜的半导体基片上。
- (2) 曝光：由光源发出的光束，经掩膜在光刻蚀剂涂层上成像，称为投影曝光。或将光束聚焦成细小束斑通过扫描在光致抗蚀剂涂层上绘制图形，称为扫描曝光。两者统称为曝光。常用的光源有电子束、离子束等。
- (3) 显影与烘干：曝光后的光致抗蚀剂在特定溶剂中把曝光图形显示出来，即为显影。其后进行 200~250℃ 的高温处理以提高光致抗蚀剂的强度，称为烘干。
- (4) 刻蚀：利用化学或物理方法，将没有光致抗蚀剂部分的氧化膜除去，称为刻蚀。刻蚀的方法有化学刻蚀、离子刻蚀、电解刻蚀等。

(5) 剥膜与检查: 用剥膜液去除光致抗蚀剂的处理为剥膜。剥膜后进行外观、线条、断面形状、物理性能和电学特性等检查。

光刻-电铸-模铸复合成型技术(LIGA)是当前的发展方向,它是在20世纪80年代中期由德国W. Ehrfeld等人发明的,是由深度同步辐射X射线光刻、电铸成型和模铸成型等技术组合而成的综合性技术,可制作高宽比大的立体微结构,加工精度可达 $0.1\mu\text{m}$,可加工的材料有金属、陶瓷和玻璃等。

8.3.4 纳米技术

纳米技术是当前先进制造技术发展的热点和重点,它通常是指纳米级($0.1\sim 100\text{nm}$)材料、产品的设计、加工、检测、控制等一系列技术。它是科技发展的一个新兴领域,不是简单的“精度提高”和“尺寸缩小”,而是从物理的宏观领域进入到微观领域,一些宏观的几何学、力学、热力学、电磁学等都不能正常描述纳米级的工程现象与规律。

纳米技术主要包括:纳米材料、纳米级精度制造技术、纳米级精度和表面质量检测、纳米级微传感器和控制技术、微型机电系统和纳米生物学等。

微型机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)是指集微型结构、微型传感器、微型执行器、信号处理、控制电路、接口、通信、电源等于一体的微型机电器件或综合体。它是美国的惯用词,日本仍习惯地称为微型机械(Micromachine),欧洲称为微型系统(Microsystem),现在大多称为微型机电系统。微型机电系统可由输入、传感器、信号处理、执行器等独立的功能单位组成,其输入是力、光、声、温度、化学等物化信号,通过传感器转换为电信号,经过模拟或数字信号处理后,由执行器与外界作用。各个微型机电系统可以采用光、磁等物理量的数字或模拟信号,通过接口与其他微型机电系统进行通信,尺寸为 $1\sim 10\text{mm}$ 的小型机械以及将来利用生物工程和分子组装可实现的 $1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 的纳米机械或分子机械,均属于微型机械范畴。

微型机电系统在生物医学、航空航天、国防、工业、农业、交通、信息等多个部门均有广泛的应用前景,已有微型传感器、微型齿轮泵、微型电动机、电极探针、微型喷嘴等多种微型机械问世。今后将在精细外科手术、微卫星的微惯导装置、狭窄空间及特殊工况下的维修机器人、微型仪表、农业基因工程等各个方面显现出巨大潜力。

目前,微型机电系统的发展前沿主要有:微型机械学研究、微型结构加工技术(高深度比多层微结构的表面加工和体加工技术)、微装配技术、微键合技术、微封装技术、微测试技术、典型微器件、微机械的设计制造技术等。

8.4 机械制造系统的自动化与计算机辅助制造技术

8.4.1 机械制造系统自动化

机械制造系统自动化可分为单一品种大批量生产的自动化和多品种小批量生产的自动化两大类,由于两类特点不同,所采用的自动化手段也不同。

1. 单一产品大批量生产的自动化

产品单一、批量大时，可采用专用设备、专用流水线和自动线等刚性自动化措施来实现，一旦产品有变化，则往往不能适应。通常采用的自动化措施有以下几项：

- (1) 通用机床的自动化改造。
- (2) 自动机床和半自动机床。
- (3) 组合机床。
- (4) 自动生产线，简称自动线，在汽车、拖拉机、轴承等制造中应用十分广泛。

图 8-10 所示是自动线的组成。较长的自动线一般都分成若干段，每段之间配置储料装置，便于分段维修，避免因故障造成全线停车，从而保证自动线的工作。在自动线设计中，生产节拍及其平衡是十分重要的，要根据产品的生产纲领及其自动线的生产节拍，拟定零件的工艺流程，进行节拍平衡。

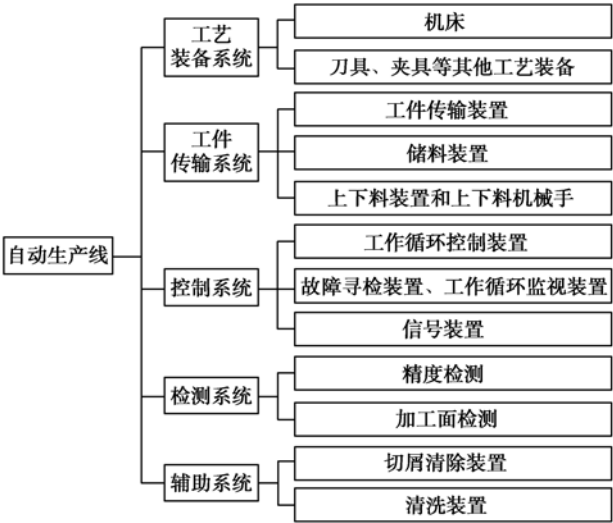


图 8-10 自动线的组成

2. 多品种小批量生产的自动化

在机械制造业中，大部分工厂企业都是多品种小批量生产。多年来，实现多品种小批量生产自动化一直是一个难题。由于计算机技术、数控技术、加工中心、工作站、工业机器人等的发展，使这方面有很大突破，出现了以计算机集成制造系统为代表的机械制造系统自动化。现在，实现多品种小批量生产自动化可以采取以下措施。

1) 成组技术

在机械加工中，成组技术是指成组工艺和成组夹具的综合，它是根据零件的形状、尺寸等几何特征和工艺特点的相似性进行分组分类，编制成组工艺，设计成组夹具。

2) 数字控制技术和数控机床

在制造工艺中，数字控制技术主要用于控制机床的运动，保证工件的尺寸和形位。由于它所控制的运动是以脉冲数量来计算的，每一个脉冲信号使机床运动部件所移动的距离称为脉动当量，所以称为数字控制。数字控制技术已经发展成基础技术，不仅可用于机床，而且可用于

机器人等其他机械中。

从数字控制机床的功能来看,数控机床有简易型、经济型、全功能型和可进行多种加工并带有自动换刀装置的加工中心。

从数字控制系统方面来看,数控机床又可分为计算机控制和计算机直接控制。计算机控制是用单台计算机控制单台机床,目前多用微型计算机控制系统,其特点是通用性好,硬件和软件功能强,工作可靠,维修方便,价格便宜。计算机直接控制是用一台计算机以分时方式控制多台机床完成各自不同的工作,故又称为群控。计算机直接控制已发展成为多级的递阶控制。

3) 适应控制

在机械加工(如切削和磨削)中,在线检测加工状态,并及时修正控制参数,以实现加工过程的优化,获得预定的加工目标或效果,这种控制称为适应控制。一个适应控制系统要能进行工作,必须具备判别功能、决策功能和校正功能。

加工过程的适应控制可分为性能适应控制和几何适应控制,前者又可分为优化适应控制和约束适应控制。

4) 柔性制造系统

这是当前应用的最广泛的制造系统,一般是指可变的、自动化程度较高的制造系统,它由多台数控机床或加工中心组成,没有固定的加工顺序和节拍,能在不停机调整的情况下更换工件及夹具,在时间和空间(多维性)上都有高度的可变性。

5) 计算机集成制造系统

它又称为计算机综合制造系统,一般是由以计算机辅助设计(CAD)为核心的产品建模信息系统,以计算机辅助制造(CAM)为中心的加工、检测、装配自动化工艺系统和以计算机辅助生产管理(CAPM)为主的管理信息系统所组成的综合体。其中,管理信息系统包括生产计划的制订和调整、物质供应计划和财务管理等。集成制造系统是一个产品设计和制造的全盘自动化系统,它强调信息集成和功能集成,进行分级管理和递阶控制。

8.4.2 成组技术

市场竞争日趋激烈,产品更新换代越来越快,产品品种增多,而每种产品的生产数量却不很多。世界上75%~80%的机械产品是以中、小批量生产方式制造的。

与大量生产企业相比,中、小批量生产企业的设备工装多,劳动生产率低,生产周期长,产品成本高,生产管理复杂,市场竞争能力差。与大批大量生产相比,小批量生产方式无论在技术水平上还是经济效益方面都不能适应生产发展和低成本的需要。

能否把大批量生产的先进工艺和高效设备以及生产方式用于组织中、小批量产品的生产,一直是国际生产工程界广为关注的重大研究课题。成组技术(Group Technology, GT)便是为了解决这一矛盾应运而生的一门新的生产技术,也是针对生产中的这种需求发展起来的一种生产和管理相结合的科学。成组技术已渗透到企业生产活动的各个环节,如产品设计、生产准备和计划管理等,并成为现代数控技术、柔性制造系统和高度自动化的集成制造系统的技术基础。

1. 成组技术的基本原理

充分利用事物之间的相似性,将许多具有相似信息的研究对象归并成组,并用大致相同的方法来解决这一组研究对象的生产技术问题,这样就可以发挥规模生产的优势,达到提高生产

效率、降低生产成本的目的,这种技术统称为成组技术。

加工零件虽然千变万化,但客观上存在着大量的相似性。有许多零件在形状、尺寸、精度、表面质量和材料等方面具有相似性,从而在加工工序、安装定位,机床设备以及工艺路线等各个方面都呈现出一定的相似性。成组技术就是对零件的相似性进行标识、归类和应用的技术。其基本原理是根据多种产品各种零件的结构形状特征和加工工艺特征,按规定的法则标识其相似性,按一定的相似程度将零件分类编组。再对成组的零件制订统一的加工方案,实现生产过程的合理化。成组技术的基本原理是利用事物相似性的原理,进行相似性的处理,具体做法是通过找出一个代表性零件(代表零件也可以是假拟的),即主样件。通过主样件解决全组(族)零件的加工工艺问题,设计全组零件能共同采用的工艺装备,并对现有设备进行必要的改装等。成组技术首先是从成组加工发展起来的。划分为同一组的零件可以按相同的工艺路线在同一设备、生产单元或生产线上完成全部机械加工。一般加工工件的改变就只需进行少量的调整工作。

实践证明,在中、小批量生产中采用成组技术,可以取得最佳的综合经济效益。归纳起来,实施成组技术可以带来以下好处:

- (1) 将中、小批量的生产纲领变为大批大量或近似于大批大量的生产,提高生产率,稳定产品质量和一致性。
- (2) 减少加工设备和专用工装夹具的数量,降低固定投入和生产成本。
- (3) 促进产品设计标准化和规格化,减少零件的规格品种,减轻产品设计和工艺规程编制工作量。
- (4) 有利于采用先进的生产组织形式和制造技术,实现科学生产管理。

2. 常见分类编码系统

为了对机械产品的零件进行科学的分类,便于计算机储存和识别,必须把各种零件的数据信息化。用一串数字和英文字母来描述零件的设计和工艺基本特征信息,称为零件的编码。它是标识相似性的手段,依据编码按一定的相似性和相似程度再将零件划分为加工组,因此它是成组技术的重要内容,其合理与否将会直接影响成组技术的经济效果。为此各国在成组技术研究和实践中都首先致力于分类编码系统的研究和制定。

分类编码方法的制定应该同时从设计和工艺两个方面来考虑。从设计角度考虑应使分类编码方法有利于零件的标准化,减少图纸数量,也就是减少零件品种,统一零件结构设计要素。从工艺角度考虑则应使具有相同工艺过程和方法的零件归并成组,以扩大零件批量。但是考虑到零件的工艺过程在很大程度上取决于零件的结构形状,而工艺方法又是在不断改进提高的,因此可以把编码数字分为以设计特征为基础的主码和以工艺特性为基础的辅码。目前国外采用的常用分类方法有20多种,编码位数一般为4~9位。也有多达26位数字和字母的,把零件特征分得很细,但实际使用比较复杂。主要分类方法有德国的Opitz和ZAFO,英国的Brisch,日本的KK-3和丰田分类法,前苏联的BEPth和我国的JLBM-1机械零件编码法则、BLBM兵器零件编码法则。

目前国内外均以人工编码为主。随着计算机技术的发展,已有自动编码系统研制成功,不仅提高了编码速度,而且消除了人工差错,提高了对零件信息描述的确切程度和一致性。

3. 成组加工的工艺准备工作

在机械加工方面实行成组技术时,其工艺准备工作包括如下五个方面的内容。

1) 零件分类编码、划分零件组

各类产品的生产纲领和图纸是工艺设计的原始资料,按照拟定的分类编码法则对零件编码。在实行成组加工的初始阶段也可以对近期产品在小范围内实行,再逐步扩大到各种产品的零件。

零件组的划分主要依据工艺相似性,因此确定相似程度很重要。例如,代码完全相同的零件划为一组,则同组零件相似性很高而批量很少,不能体现成组效果。相似程度应根据零件特点、生产批量和设备条件等因素来确定。

零件分类成组是实施成组技术的一项基础工作。为了减少现有零件工艺过程的多样性,扩大零件的工艺批量,提高工艺设计的质量,加工零件需根据其结构特征和工艺特征的相似性进行分类成组。在施行成组技术时,首先必须按照零件的相似特征将零件分类编组,然后才能以零件组为对象进行工艺设计和组织生产。零件分类成组的方法有三种:编码分类法、人工视检法和生产流程分析法。

2) 拟定成组工艺路线

选择或设计主样件,按主样件编制工艺路线,它将适合该零件组内所有零件的加工;但是对于结构复杂的零件,要将组内全部形状结构要素综合而形成一个主样件,通常是困难的。此时可采用流程分析法,即分析组内各零件的工艺路线,综合成为一个工序完整、安排合理、适合全组零件的工艺路线,编制出成组工艺卡片。

3) 选择设备并确定生产组织形式

成组加工的设备可以有两种选择:一是采用原有通用机床或适当改装,配备成组夹具和刀具;二是设计专用机床或高效自动化机床及工装。这两种选择相应的加工工艺方案差别很大,所以拟定零件工艺过程时应考虑到设备选择方案。各设备的台数根据工序总工时计算,应保证各台设备首先是关键设备达到较高负荷率,一般可以留 10%~15% 的负荷量供扩大相似零件加工之用。此外,设备的利用率不仅是指时间负荷率,还包括设备能力的利用程度,如空间、精度和功率负荷率。

4) 设计成组夹具、刀具的结构和调整方案

这是实现成组加工的重要条件,将直接影响成组加工的经济效果。因为改变加工对象时,要求对工艺系统只需少量的调整。如果调整费事,相当于生产过程中断,准备与终结时间延长,就体现不出“成组批量”了。因此,对成组夹具、刀具的设计要求是改换工件时调整简便、迅速,定位夹紧可靠,能实现生产的连续性,且调整工作对工人技术水平要求不高。

5) 进行技术经济分析

成组加工应做到在稳定地保证产品质量的基础上,达到较高的生产率和设备负荷率(60%~70%)。因此根据以上制订的各类零件的加工过程,计算单件时间定额及各台设备或工装的负荷率,若负荷率不足或过高,则可调整零件组或设备选择方案,

4. 成组生产组织形式

随着成组加工的推广和发展,它的生产组织形式已由初级形式的成组单机加工发展到成组生产单元、成组生产线和自动线,以至现代最先进的柔性制造系统和全盘无人化工厂。

1) 成组单机

在转塔车床、自动车床或其他数控机床上成组加工小型零件,这些零件的全部或大部分加工工序都在这一台设备上完成,这种形式称为成组单机加工。成组单机加工时机床的布置虽然

与机群式生产工段类似,但在生产方式上却有着本质上的差异,它是按成组工艺来组织和安排生产的。

2) 成组生产单元

在一组机床上完成一个或几个工艺相似零件组的全部工艺过程,该组机床即构成车间的一个封闭生产单元系统。这种生产单元与传统的小批量生产下常用的“机群式”排列的生产工段是不一样的。一个机群式生产工段只能完成零件的某一个工序,而成组生产单元却能完成一定零件组的全部工艺过程。成组生产单元的布置要考虑每台机床的合理负荷。如果条件许可,应采用数控机床、加工中心代替普通机床。

成组生产单元的机床按照成组工艺过程排列,零件在单元内按各自的工艺路线流动,缩短了工序间的运输距离,减少了在制品的积压,缩短了零件的生产周期;同时,零件的加工和输送不需要保持一定的节拍,使得生产的计划管理具有一定的灵活性;单元内的工人工作趋向专业化,加工质量稳定,效率比较高,所以成组生产单元是一种较好的生产组织形式。

3) 成组生产线

成组生产线是严格地按零件组的工艺过程组织起来的。在线上各工序节拍是相互一致的,所以其工作过程是连续而有节奏地进行的。这样就可以缩短零件的生产时间和减少在制品数量。一般在成组生产线上配备了许多高效的机床设备,使工艺过程的生产效率大为提高。

成组生产线又有两种形式:成组流水线和成组自动线。前者工件在工序间的运输是采用滚道和小车进行的,它能加工的工件种类较多,在流水线上每次投产批量的变化也可以较大。成组自动线则是采用各种自动输送机构来运送工件,所以效率更高。但它所能加工的工件种类较少,工件投产批量也不能做很大变化,工艺适应性较差。

5. 成组工艺过程的制订

零件分类成组后,便形成了加工组,下一步就是针对不同的加工组制订适合组内各件的成组工艺过程。编制成组工艺的方法有两种:复合零件法和复合路线法。

复合零件即主样件,它包含一组零件的全部形状要素,有一定的尺寸范围,它可以是加工组中的一个实际零件,也可以是假想零件。以它作为样板零件,设计适用于全组的用工艺规程。在设计复合零件的工艺过程前要检查各零件组的情况,每个零件组只需要一个复合零件。对于形状简单的零件组,零件品种不超过100种为宜,形状复杂的零件组可包含20种左右的零件。这样设计出的复合零件不会过于复杂或过于简单。设计复合零件时,对于零件品种数少的零件组,应先分析全部零件图,选取形状最复杂的零件作为基础件,再把其他图样上相同的形状特征加到基础件上,就得到复合零件。对于比较大的零件组,可先分成几个小的件组,各自合成一个组合件,然后再由若干个组合件合成整个零件组的复合零件。进行工件设计时,要对零件组内各零件的工艺仔细分析,认真总结,每一个形状要素都应考虑在内,满足该零件组所有零件的加工。

复合路线法是从分析加工组中各零件的工艺路线入手,从中选出一个工序最多、加工过程安排合理并有代表性的工艺路线。然后以它为基础,逐个地与同组其他零件的工艺路线比较,并把其他特有的工序,按合理的顺序叠加到有代表性的工艺路线上,使之成为一个工序齐全、安排合理、适用于同组内所有零件的复合工艺路线。

8.4.3 柔性制造系统

1. 概述

成组技术能解决外形结构和加工工艺相差不大的工件的加工，但它不能很好地解决多品种、中小批量生产的自动化问题。为了解决机械制造业多品种、中小批量生产的自动化问题，除了用计算机控制单个机床及加工中心外，还可借助计算机把多台数控机床连接起来组成一个柔性制造系统。

柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）就是由计算机控制的、以数控机床设备为基础和以物料储运系统连成的、能形成没有固定加工顺序和节拍的自动加工制造系统。它的主要特点如下。

- （1）高柔性：即具有较高的灵活性、多变性，能在不停机调整的情况下，实现多种不同工艺要求的零件加工和不同型号产品的装配，满足多品种、小批量的个性化加工需求。
- （2）高效率：能采用合理的切削用量实现高效加工，同时使辅助时间和准备与终结时间减少到最低的程度。
- （3）高度自动化：加工、装配、检验、搬运、仓库存取等，使多品种成组生产达到高度自动化，自动更换工件、刀具、夹具，实现自动装夹和输送，自动监测加工过程，有很强的系统软件功能。
- （4）经济效益好：柔性化生产可以大大减少机床数目、减少操作人员、提高机床利用率，可以缩短生产周期、降低产品成本，可以大大削减零件成品仓库的库存、大幅度减少流动资金、缩短资金的流动周期，因此可取得较高的综合经济效益。

2. 柔性制造系统的组成

一个柔性制造系统可概括为由三部分组成，即多工位数控加工系统、自动化的物料储运系统和计算机控制的信息系统，如图 8-11 所示。

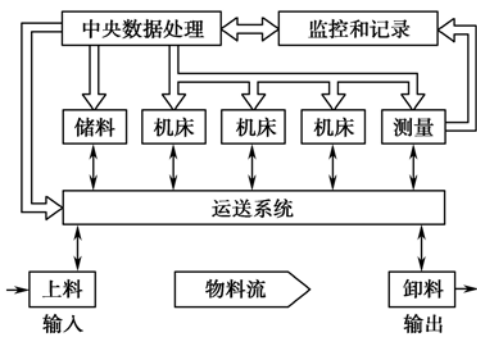


图 8-11 FMS 系统构成图

（1）加工系统：加工系统的功能是以任意顺序自动加工各种工件，并能自动更换工件和刀具。它通常由若干台加工零件的 CNC 机床和 CNC 板材加工设备以及操纵这种机床要使用的工具所构成。在加工较复杂零件的 FMS 中，由于机床上机载刀库能提供的刀具数目有限，除尽可能使产品设计标准化，以便使用通用刀具和减少专用刀具的数量外，必要时还需要在加工系

统中设置机外自动刀库,以补充机载刀库容量的不足。

(2) 物流系统: FMS 中的物流系统与传统的自动线或流水线有很大的差别,整个工件输送系统的工作状态是可以进行随机调度的,而且都设置有储料库以调节各工位上加工时间的差异。物流系统包含工件的输送和储存两个方面。

① 工件输送: 包括工件从系统外部送入系统和工件在系统内部传送两部分。目前,大多数工件的送入系统和在夹具上装夹工件仍由人工操作,系统中设置装卸工位,较重的工件可用各种起重设备或机器人搬运。工件输送系统按所用运输工具可分成自动输送车、轨道传送系统、带式传送系统和机器人传送系统四类。

② 工件的存储: 在 FMS 的物料系统中,设置适当的中央料库、托盘库及各种形式的缓冲储存区来进行工件的存储,保证系统的柔性。

(3) 信息系统: 信息系统包括过程控制及过程监视两个子系统,其功能主要是进行加工系统及物流系统的自动控制,以及在线状态数据自动采集和处理。FMS 中信息由多级计算机进行处理和控制在控制。

3. 柔性制造系统的类型及其适应范围

柔性制造系统一般可以分为柔性制造单元、柔性制造系统、柔性制造生产线和无人化工厂几种类型。

1) 柔性制造单元 (Flexible Manufacturing Cell, FMC)

FMC 由 1~2 台数控机床或加工中心,并配备有某种形式的托盘交换装置、机械手或工业机器人等夹具工件的搬运装置组成,由计算机进行实时控制和管理。它是一种带工件库和夹具库的加工中心设备,能够加工多品种的零件,同一种零件数量可多可少,特别适合多品种、小批量零件的加工。

2) 柔性制造系统

柔性制造系统由两个以上柔性制造单元或多台加工中心组成(4 台以上),并用物料储运系统和刀具系统将机床连接起来,工件被装夹在随行夹具和托盘上,自动按加工顺序在机床间逐个输送。它适用于多品种、小批量或中批量复杂零件的加工。柔性制造系统主要应用的产品领域是汽油机、柴油机、机床、汽车、齿轮传动箱,武器等。加工材料中铸铁占的比例较大,因为其切屑较容易处理。

3) 柔性生产线 (Flexible Manufacturing Line, FML)

零件生产批量较大而品种较少的情况下,柔性制造系统的机床可以完全按照工件加工顺序而排列成生产线的形式,这种生产线与传统的刚性自动生产线的不同之处在于能同时或依次加工少量不同的零件,当零件更换时,其生产节拍可做相应的调整,各机床的主轴箱也可自行进行更换。较大的柔性制造系统由两个以上柔性制造单元或多台数控机床、加工中心组成,并用一个物料储运系统将机床连接起来,工件被装夹在夹具和托盘上,自动按加工顺序在机床间逐个输送。它可以根据加工需要自动调度和更换刀具,直至加工完毕。

4) 无人化自动工厂 (Automation Factory, AF)

在一定数量的柔性制造系统的基础上,用高一级计算机把它们联结起来,对全部生产过程进行调度管理,加上立体仓库和运用工业机器人进行装配,就组成了生产的无人化工厂。日本近年来出现了采用柔性制造系统的无人化工厂。无人搬运车从原材料自动仓库将毛坯运至加工站,然后由机械手完成机床工作地的装卸工作。机床在加工过程中有监视装置。加工完毕后转

入零件和部件自动仓库，并能自动完成产品的装配工作。对这种工厂来说，由于生产的高度自动化，白天在车间中只有几十名工人，夜班时在车间里没有工人，只有一个人在控制室内监控，而所有机床能在夜间无人照管下加工零件。这样在一天 24h 中机床的可用时间接近 100%，而机床的实际利用率平均达到 65%~70%。结果在这一面积仅 20000m² 的工厂中，每月生产 100 台机器人、75 台加工中心和 75 台线切割机床，可见它显著地提高了经济效益。

应当指出，柔性制造系统的投资是很大的。柔性制造系统带来的经济效益如减少机床数、减少操作人员、提高机床利用率、缩短生产周期、降低产品成本等是巨大的。但上述经济效益能否使投资在短期内回收，将是采用柔性制造系统进行决策的一个重要依据。因而国外从 20 世纪 70 年代起就一直在研究和开发柔性制造系统的模拟技术，以便在新系统建立（或老系统的改造）之前，借助计算机上的系统模拟，找到最优的系统构成。

4. FMS 中的机床设备和夹具

1) 加工设备

FMS 的机床设备一般选择卧式、立式或立卧两用的数控加工中心。数控加工中心机床是一种带有刀库和自动换刀装置（ATC）的多工序数控机床，工件经一次装夹后，能自动完成铣、镗、钻、铰等多种工序的加工，并且有多种换刀和选刀功能，从而可使生产效率和自动化程度大大提高。

在 FMS 的加工系统中还有一类加工中心，它们除了机床本身之外，还配有一个储存工件的托盘站和自动上下料的工件交换台。当在这类加工中心机床上加工完一个工件后，托盘交换装置便将加工完的工件连同托盘一起拖回环形工作台的空闲位置，然后按指令将下一个待加工的工件/脱盘转到交换装置，由托盘交换装置将它送到机床上进行定位夹紧以待加工。这类具有储存较多工件/托盘的加工中心是一种基础形式的柔性制造单元。

FMS 对机床的基本要求是：①工序集中；②易控制；③高柔性度和高效率；④具有通信接口。

2) 机床夹具

目前，用于 FMS 机床的夹具有两个重要的发展趋势：

- (1) 大量使用组合夹具，使夹具零部件标准化，可针对不同的服务对象快速拼装出所需的夹具，使夹具的重复利用率提高；
- (2) 开发柔性夹具，使一套夹具能为多个加工对象服务。

5. 自动化仓库

FMS 的自动化仓库与一般仓库不同。它不仅是储存和检索物料的场所，同时也是 FMS 物料系统的一个组成部分。它由 FMS 的计算机控制系统控制，从功能性质上说，它是一个工艺仓库。正因为如此，它的布置和物料存放方法也以方便工艺处理为原则。目前，自动化仓库一般采用多层立体布局的结构形式，所占用的场地面积较小。

6. 物料运载装置

物料运载装置直接担负着工件、刀具以及其他物料的运输，包括物料在加工机床之间、自动仓库与托盘存储站之间以及托盘存储站与机床之间的输送与搬运。FMS 中常见的物料运载装置有传送带、自动运输小车和搬运机器人等。

7. 刀具管理系统

刀具管理系统在 FMS 中占有重要的地位,其主要职能是负责刀具的运输、存储和管理,适时地向加工单元提供所需的刀具,监控管理刀具的使用,及时取走已报废或耐用度已耗尽的刀具,在保证正常生产的同时,最大限度地降低刀具的成本。刀具管理系统的功能和柔性程度直接影响整个 FMS 的柔性和生产率。典型的 FMS 的刀具管理系统通常由刀库系统、刀具预调站、刀具装卸站、刀具交换装置以及管理控制刀具流的计算机组成。

8. 控制系统

控制系统是 FMS 的核心。它管理和协调 FMS 内各项活动,以保证生产计划的完成,实现最大的生产效率。FMS 除了少数操作由人工控制外(如装卸、调整和维修),可以说正常的工作完全是由计算机自动控制的。FMS 的控制系统通常采用两级或三级递阶控制结构形式,在控制结构中,每层的信息流都是双向流动的。然而,在控制的实时性和处理信息量方面,各层控制计算机又是有所区别的。这种递阶的控制结构,各层的控制处理相对独立,易于实现模块化,使局部增、删、修改简单易行,从而增加了整个系统的柔性和开放性。

8.4.4 计算机集成制造系统

1. 计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)的概念

计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)的软件系统是分别研制、开发的。生产技术的高度发展要求设计与制造在产品生产中有机结合,实现一体化,从而发展形成集成制造系统。用计算机网络将产品生产全过程的各个子系统有机地集成一个整体,以实现生产的高度柔性化、自动化和集成化,达到高效率、高质量、低成本的生产目的,这种系统就是计算机集成制造系统。

CIMS 的概念包含两个基本观点:

(1) 系统的观点。企业生产的各个环节,即从市场分析、产品设计、加工制造、经营管理到售后服务的全部生产活动是一个不可分割的整体,要紧密连接,统一考虑。

(2) 信息化的观点。整个生产过程实质上是一个数据的采集、传递和加工处理的过程,最终形成的产品可以看做数据的物质表现。

由此可知,CIMS 的内涵可以表述为:CIMS 是一种组织、管理与运行企业的哲理,它将传统的制造技术与现代信息技术、管理技术、自动化技术、系统工程技术等有机结合,借助计算机(硬、软件),使企业产品的生命周期(市场需求分析→产品意义→研究开发→设计→制造→支持,包括质量、销售、采购、发送、服务以及产品最后报废、环境处理等)各阶段活动中有关的人、组织、经费管理和技术等要素及信息流、物流和价值流有机集成并优化运行,实现企业制造活动中的计算机化、信息化、智能化、集成优化,以达到产品上市快、高质、低耗、服务好、环境清洁,提高企业的柔性、健壮性、敏捷性,使企业在市场竞争中立于不败之地。

2. CIMS 系统的组成

CIMS 是一项发展中的技术,它的组成还没有统一的模式。但是根据前面所述的概念,可

以认为 CIMS 是由以下六大系统组成的。

- (1) 集成化工程设计与制造系统 (CAD/CAE/CAPP/CAM);
- (2) 集成化生产管理信息系统 (CAPM 或 MIS);
- (3) 柔性制造系统 (FMS/FMC);
- (4) 数据库与网络 (DB 与 NW);
- (5) 质量保证系统 (QCS);
- (6) 物料储运和保障系统。

3. CIMS 的关键技术

(1) 信息集成。针对设计、管理和加工制造中大量存在的自动化独立制造岛 (指由多台机床组成的系统, 由于其具有一定的自主性和封闭性, 故称为“独立岛”), 实现信息正确、高效的共享和交换, 是改善企业技术和管理水平必须首先解决的问题。信息集成的主要内容有企业建模、系统设计方法、软件工具和规范, 这是企业信息集成的基础; 异构环境下的信息集成。

(2) 过程集成。企业除了信息集成这一技术手段之外, 还可以对过程进行重构。产品开发设计中的各个串行过程尽可能多地转变为并行过程, 在设计时考虑到下游工作中的可制造性、可装配性, 设计时考虑质量 (质量功能分配), 则可以减少反复, 缩短开发时间。

(3) 企业集成。为了充分利用全球制造资源, 把企业调整成适应全球经济、全球制造的新模式, CIMS 必须解决资源共享、信息服务、虚拟制造、并行工程、资源优化、网络平台等关键技术, 以便更快、更好、更省地响应市场。

实施 CIMS 要花费巨大的投资, 而且需要雄厚的技术基础, 包括企业应用 CIMS 单项技术的水平以及一支强大的技术队伍。它涉及许多工作新技术, 除了硬件之外, 还需要功能齐全的数据库软件和系统管理软件。

CIMS 的发展水平和完善程度代表着机械制造业的发展水平。近年来, 我国在汽车、民用飞机以及机床生产等行业, 已经开始建立 CIMS 系统, 有些系统即将启用, 这标志着我国的机械制造水平已发展到了一个新的阶段。

习题 8

- 8-1. 简述现代制造技术的内容与特点。
- 8-2. 特种加工与传统的机械加工有什么不同?
- 8-3. 简述各种特种加工技术的加工原理、特点及应用场合。
- 8-4. 精密超精密加工方法有哪些?
- 8-5. 简述金刚石刀具超精密切削加工机理及影响超精密切削加工的主要因素。
- 8-6. 简述成组技术与 FMS、CIMS 之间的关系。